

Jori Fager

110 KV VOIMAJOHDON MAADOITUSSUUNNITTELU SEKÄ
VAARAJÄNNITSELVITYS

Sähkötekniikan koulutusohjelma
2016

110 KV VOIMAJOHDON MAADOITUSSUUNNITTELU SEKÄ VAARAJÄNNITSELVITYS

Fager, Jori
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Toukokuu 2016
Ohjaaja: Nieminen, Esko
Sivumäärä: 77
Liitteitä: 6

Asiasanat: maadoittaminen, voimajohto, sähköturvallisuus, vaarajännitteet, suurjännite

Suurjännitteisen voimajohdon rakentaminen on laaja projekti. Suunnittelu ja rakentaminen koostuvat alustavasta reittisuunnittelusta, yleissuunnittelusta, rakentamisvaiheesta ja lopputarkastuksesta. Rakentaminen vaatii ison luvitusprosessin ja vaikutukset ympäristölle selvitetään. Hankeen kesto kaikkine vaiheineen on noin 5-8 vuotta.

Tämän työn tarkoituksena oli toteuttaa yleissuunnitteluvaiheeseen kuuluvat maan ominaisvastuksien määrittäminen, maadoitussuunnitelmien laadinta pylväspaikoille, sekä vaarajännitteiden tarkastelu. Vaarajännitteiden tarkastelu jakaantuu sekä maapotentiaalien että induktiovaarajännitteiden tarkasteluun.

Tutkimustyö jakautui kolmeen osaan. Maan ominaisvastukset mitattiin rakennettavan suurjännitejohdon jokaiselta pylväspaikalta. Mittaustöiden jälkeen tehtiin vaadittavat laskelmat ja mitoitettiin maadoituselektrodit jokaiselle pylväspaikalle. Maapotentiaalit sekä induktiovaarajännitteet tarkasteltiin sähköturvallisuuden kannalta koko voimajohdolle.

Työ dokumentoitiin. Pylväspaikoille mitoitettut elektrodirakenteet piirrettiin maadoitussuunnittelukuviin. Lopuksi kirjoitettiin maapotentiaali- ja induktiovaarajänniteraportit.

110 KV TRANSMISSION LINE EARTHING PLANNING AND HAZARDOUS VOLTAGE STATEMENT

Fager, Jori

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Electrical Engineering

May 2016

Supervisor: Nieminen, Esko

Number of pages: 77

Appendices: 6

Keywords: earthing, transmission line, electrical safety, hazardous voltages, high voltage

Construction of high-voltage transmission line is a major project. Design and construction consist of the preliminary route planning, general planning, building phase and final inspection. Construction needs huge permitting process and also environmental impacts are examined. The duration of the project for all stages is about 5-8 years.

Purpose of this work was to carry out part of the general planning phase, involving the determination of the soil specific resistivity, earthing design accounting for tower places, as well as examination of the hazardous voltages. Hazard voltage statement is divided into both ground potential and induced hazardous voltage examination.

The research was divided into three parts. Soil specific resistances were measured for every tower places of high-voltage line to be built. After the measurement work required calculations were made and earthing grounding electrodes were dimensioned for every tower places. Ground potential, as well as induced hazardous voltages were examined to meet electrical safety for entire power line.

The work was documented. All those dimensioned electrode structures for tower places were drawn into earthing design pictures. Finally ground potential report and induced hazardous voltage report were written.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Tavoitteet	6
1.2	Työn toteutus	6
1.3	Raportoinnin toteutus - valmis opinnäytetyö.....	7
1.4	Vaatimukset salassapidolle	7
2	SÄHKÖVOIMAJÄRJESTELMÄ.....	7
2.1	Järjestelmän rakenne	7
2.2	Pylväsrakenteet tehonsiirrossa	9
2.3	Virta- ja ukkosjohtimien materiaali (OPGW).....	11
2.4	Voimajohdon suojaus ja laukaisuajat.....	12
3	SUURJÄNNITELAITTEISTOJEN MAADOITTAMISESTA.....	13
3.1	Maadoitukset sähkötekniikassa.....	13
3.2	Turvallisuusnäkökohtia.....	14
3.3	Maadoitus- ja vaarajännitteet.....	15
4	VAARAJÄNNITTEIDEN KYTKEYTYMISTAVAT	17
4.1	Kapasitiivinen kytketyminen	17
4.2	Induktiivinen kytketyminen	18
4.3	Konduktiivinen kytketyminen	20
5	PYLVÄSMAADOITUKSET JA UKKOSJOHTIMET	20
5.1	Tehtävä.....	20
6	MITTAUSTEN SUORITUS	22
6.1	Wennerin menetelmä	22
6.2	Alustavat toimet ennen mittausta.....	23
6.3	Mittauksien suoritus maastossa.....	25
6.4	Mittauslaitteiston huolto	26
6.5	Havaintoja mittauksista.....	27
7	MAADOITUSSUUNNITTELU	28
7.1	Maan ominaisresistanssien laskenta	28
7.2	Pylväismaadoitusten tavoitearvojen ja tavoitekertoimen määrittäminen.....	29
7.3	Maadoitusresistanssin laskenta pylväälle	31
7.4	Perusmaadoitus ja maadoituselektrodien muodot.....	33
7.5	Maadoituselektrodien suunnittelu pylväälle	34
7.6	Potentiaaliohjauselektrodin huomiointi	35
7.7	Maadoitusten yhdistäminen ja putkittaminen	36
7.8	Tarvittavan materiaalin seuranta.....	38

7.9	Maadoitussuunnitelman dokumentointi.....	38
8	MAAPOTENTIALIEN LASKENTA.....	40
8.1	Pahin vikatapaus huomioidaan	40
8.2	Maasulkuvirtojen redusointi pylväspaikoille.....	41
8.3	Johtosuureiden laskenta	43
8.4	Impedanssiketju - pylväspotentiaalien laskenta.....	44
8.5	Maapotentiaalien leviäminen ja arviointi.....	45
8.6	Sähköasemien maadoitusimpedanssien sovittelu	46
8.7	Johdon maapotentiaaliprofiili	47
9	MAAPOTENTIALISELVITYS.....	48
9.1	Selvityksen taustaa.....	48
9.2	Kosketusjännitteiden huomiointi henkilöturvallisuuden kannalta.....	49
9.3	Kosketusjännitteille määrätyt raja-arvot	50
9.4	Ympäristöön siirtyvät jännitteet.....	52
9.5	Viestintäviraston määräys sähköisestä suojaamisesta	54
9.6	Sähköasemien vaarajänniteselvitys.....	54
9.7	Rautatie voimajohdon läheisyydessä	56
9.8	Maakaasuputkisto voimajohdon läheisyydessä	57
9.9	Raja-arvot ylittyvät	59
10	INDUKTIOVAARAJÄNNITTESELVITYS	60
10.1	Selvityksen taustaa.....	60
10.2	Tiedon keruu ja kartta-aineiston tutkinta	61
10.3	Televerkon rakenne.....	62
10.4	Induktiovaarajännitteiden määräyksiä ja raja-arvoja	63
10.5	Indusoiva maavirta.....	64
10.6	Laskelmien peruskäsitteitä.....	66
10.7	Varsinaiset rajapituuslaskelmat	68
10.8	Induktiiviset vaarajännitteet normaalikäytössä.....	69
10.9	Kapasitiiviset vaarajännitteet normaalikäytössä	70
10.10	Vaarajännitteet maasulun aikana	71
11	YHTEENVETO	73
	LÄHTEET	
	LIITTEET	

1 JOHDANTO

1.1 Tavoitteet

Sähköastek Oy tilasi työn, jonka tavoitteena oli toteuttaa kantaverkon uuden 110 kV:n voimalinjan maadoitussuunnittelu sekä vaarajänniteselvitys. Työn ohella tilaajalle lähdettiin hakemaan kokemuksia suuren voimalinjan maadoitusmittauksista. Työn lopputuloksena tehty maadoitussuunnitelma (salassa pidettävä) sisältää pylväskohtaisesti tehdyt laskelmat maadoitusresistanssin tavoitearvoista, odotettavissa olevista maadoitusresistansseista, maadoitusmateriaalin menekeistä ja asemapiirroksen suunnitelluista maadoituselektrodeista sekä niiden sijainneista johtoaukealla. Vaarajänniteselvitys muodostuu maapotentiaalien tarkastelusta sekä induktioselvityksestä (salassa pidettävä). Kyseessä on kaksi eri dokumenttia, jossa voimalinja on tarkasteltu läpikotaisin lähtöaineiston sekä laskelmien perusteella. Maapotentiaaliselvitys sisältää maapotentiaalin aiheuttamien vaarojen tunnistamisen ja kaiken erikoisuuden selvittelyn johtoalueella, kun taas induktioselvitys perehtyy maapotentiaalin leviämiseen viestintäverkkoihin sekä pienjännitemaadoituksiin.

1.2 Työn toteutus

Työ toteutettiin kahdessa vaiheessa. Maadoitussuunnittelun pohjana ja lähtötietoina jokaiselta uudelta pylväspaikalta mitattiin maan ominaisvastusarvot syksyn 2015 aikana. Pylväiden lukumäärä lähenteli 300 kappaletta. Toisessa vaiheessa toteutettiin laskennallinen ja kirjallinen osuus. Yksinkertaistaen - maastossa tehtyjen mittaustulosten perusteella laskettiin maaperän johtavuus, laskettiin pylväskohtaiset potentiaalit maasulun aikana, määriteltiin sallitut raja-arvot vikajännitteille ja laadittiin maapotentiaali- sekä induktiovaarajänniteselvitys. Laskennan perusteella jokaiselle pylväspaikalle suunniteltiin maadoitus.

1.3 Raportoinnin toteutus - valmis opinnäytetyö

Opinnäytetyön raportti toteutettiin osittain laskennan ja varsinaisten induktio- ja vaarajänniteselvitysdokumenttien työstön rinnalla. Opinnäytetyön raportti avaa maadoitussuunnitteluprosessia ja vaarajännitteiden huomiointia. Lukijalle se kuvaa maadoitussuunnittelun moniulotteisuutta. Se ei ole kaiken kattava teos, mutta antaa kuvan voimajohdon pylväsmaadoitusjärjestelmään ja vaarajänniteselvityksiin liittyvistä yleisperiaatteista. Tarkoitus on ollut tehdä teorian kanssa keskustelemaa työtä ja limit-tää omaa tekemistä teorian keskelle. Raportti on samalla "työohje" yhtiön muille suunnittelijoille.

1.4 Vaatimukset salassapidolle

Varsinainen tilaajalle tehty maadoitussuunnitelma sekä selvitysdokumentit sisältävät salassa pidettäväksi tarkoitettua materiaalia, eikä niitä voida linkittää työhön. Opinnäytetyön raportti on laadittu niin, että luottamuksellisuus säilyy. Tämän vuoksi työssä ei mainita sähköasemien tai paikkakuntien nimiä, oikeita pylväsnumeroita, laskennallisia taulukoita, ei myöskään sijaintitietoon perustuvia kohteita. Liitteissä esitetyissä materiaaleissa ja laskentataulukoissa on sisällytetty hajontaa, jotta raportissa näkyviä tuloksia ei voi suoraan hyödyntää ja osoittaa tiettyyn pylväsipaikkaan.

2 SÄHKÖVOIMAJÄRJESTELMÄ

2.1 Järjestelmän rakenne

Yhteiskuntamme elää sähköstä. Sähkön tuotanto, siirto, muuntaminen ja jakelu ovat nykyisen infrastruktuurin elinehto. Lähes kaikki tieto- ja viestintäyhteiskunnan laitteet toimivat sähköllä.

Suomessa kaikki kuluttajat ja voimalaitokset on kytketty yhteiseen sähkövoimajärjestelmään. Järjestelmä koostuu voimalaitoksista, suurjännitteisestä kantaverkosta,

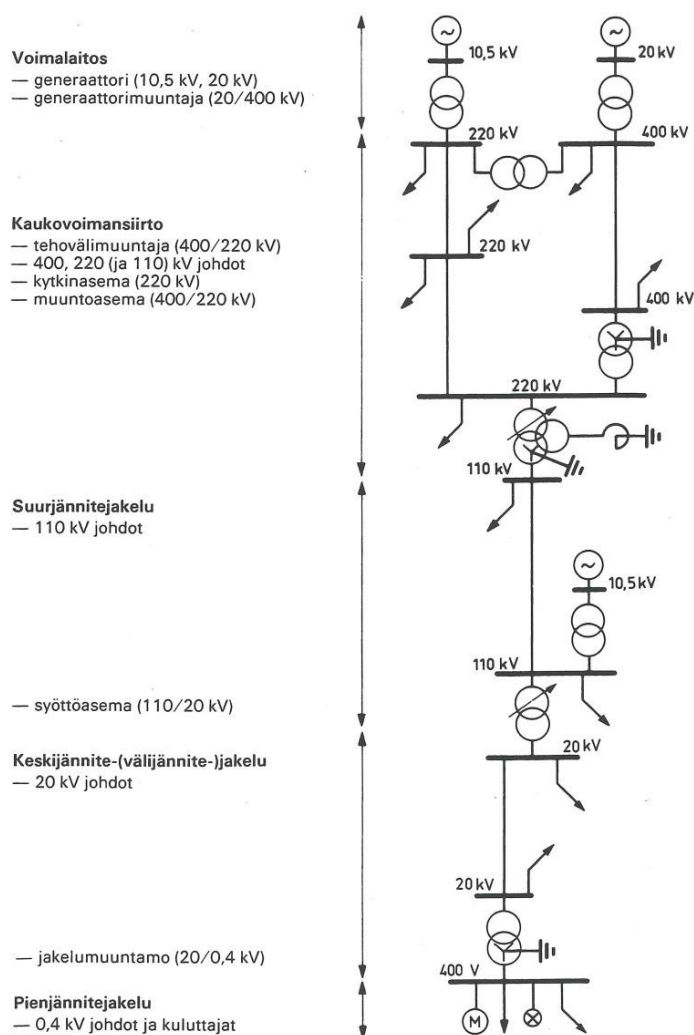
suur- ja keskijännitteisistä alue- ja jakeluverkoista sekä lopulta pienjänniteverkoista. Voimalaitoksilta sähkö siirretään yleensä koko maan kattavaan sähkön suurjännitteeseen siirtoverkkoon, jota kutsutaan kantaverkoksi (Liite 1). Suomessa kantaverkkoa hallinnoi Fingrid Oyj, ja kantaverkon pääjännitteet ovat 400, 220 ja 110 kilovolttia. Kantaverkko toimii järjestelmässä runkoverkkona, ja siihen liittyvät voimalaitokset, suurteollisuus sekä alueelliset jakeluverkot. Siirtoverkko liitetään jakeluverkkoon sähköasemilla, joista sähkö siirretään kuluttajille keskijänniteverkossa (yleensä 20 kV). Keskijännite muunnetaan jakelumuuntajien (20/0,4kV) avulla pienjännitteeksi kuluttajille. (Fingrid Oyj www-sivut 2016)

Siirto- ja jakeluverkkona käytetään 3-vaiheista vaihtosähköjärjestelmää. Järjestelmän etuja ovat hyvällä hyötysuhteella tapahtuva voimansiirto, jännitteen muuntaminen eri jännitetasoille sekä teollisuuden käyttämät lukuisat moottorikäytöt. Järjestelmän jännitteet ovat 120° vaihesiirrossa toisiinsa nähden. (Elovaara & Laiho 1988, 31.)

Sähköä on vaikea varastoida suuria määriä, jolloin tuotannon on oltava joka hetki tasapainossa kulutukseen nähden. Tuotannon on siis vastattava kulutusta, jolloin kantaverkon sanotaan olevan tehotasapainossa. Vaihtelut tehotasapainossa heijastuvat verkon taajuuteen. Ylituotannossa taajuus nousee, ja kulutuksen noustessa taajuus laskee, ellei tuotantoa lisätä. (Fingrid Oyj www-sivut 2016)

Kuvassa 1 on kuvattu sähkövoimajärjestelmän yleisrakennetta voimalaitokselta kuluttajalle. Voimalaitoksen generaattoreissa tuotetun sähkön jännite nostetaan korkeaksi siirtoa varten, ja jännitetasoa pudotetaan asteittain tultaessa lähemmäksi kuluttajia. Suurjännitteen käytöllä saadaan siirtohäviöt verkossa pieneksi, sillä pätötehohäviöt siirrossa ovat suoraan verrannollisia virran neliöön $P_h=R \cdot I^2$. Eri jännitetasot vaativat luonnollisesti suuren määrän muuntajia. Jännitteiden muuntamiset ja johtokytkennät tehdään kantaverkon ja alueverkkojen sähköasemilla.

Kuva 1. Sähkövoimajärjestelmän yleisrakenne (Elovaara & Laiho 1988, 30)

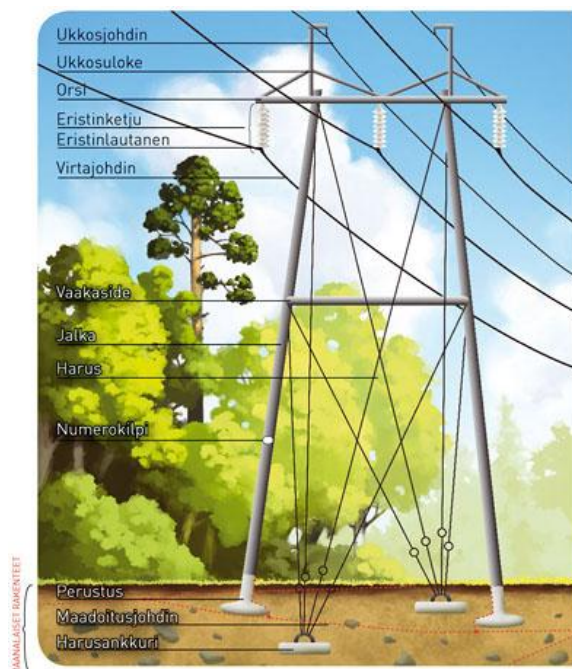


2.2 Pylväsrakenteet tehonsiirrossa

Sähköä voidaan siirtää ilmajohdoilla tai maakaapeleilla. Sähkön siirrossa ilmajohdoilla (jota tämä työ sivuaa) virta- ja ukkosjohtimet ripustetaan pylväisiin. Pylväs koostuu pääosissa runkorakenteesta, orresta, ukkospukeista, haruksista ja vaakasiteistä. Virtajohtimet ripustetaan orteen eristinketjujen sekä ketjuissa kiinni olevien kannatuspidikkeiden välityksellä (eristinlautasten lukumäärä kertoo jännitetason). Ukkosjohtimet ripustetaan ukkospukkeihin. Opinnäytetyön kannalta tärkeimmät osat näkyvät kuvassa 2, jossa on kuvattu pylvään maanalaisia rakenteita. Maan alla näkyvät perustukset, maadoitusjohtimet sekä harusankkuri. Suurjännitepylvään ukkosjohtimet on yhdistetty pylvään metallisiin jalkoihin, joita pitkin vikavirta pääsee kulkeutumaan maahan. Pylväsjalat on yhdistetty toisiinsa ja ympäröivään maaperään maa-

doitusjohtimilla. Maaperän ominaisuus vaikuttaa suuresti pylvään maadoituksen rakentamiseen. (Elovaara & Haarla 2011, 264.)

Kuva 2. Suurjännitepylvään perusosat (Fingrid Oyj www-sivut 2016)



Pylväitä on erilaisia riippuen käyttötarkoituksesta. Suorilla johto-osuuksilla käytetään ripustuspylväitä, joihin virta- ja ukkosjohtimet on ripustettu. Johtolinjan kääntyessä sivuttaisvoimat ovat suuret, ja tarvitaan erikseen mitoitettuja kulmapylväitä. Osa pylväistä on kiristyspylväitä, koska valmistettavat ilmajohtojen pituudet ovat rajalliset. Kiristyspylväillä ilmajohto kiristetään, päätetään eristinketjuun ja uuden virtajohdinten veto aloitetaan pylvään vastakkaiselta puolelta. Virtapiirin yhdistys jatkokohdassa tehdään kansankielellä "jompeilla". Toki suurjännitejohtoja voidaan jatkaa jännevälin keskelläkin, jolloin jatkos tehdään räjähdejatkolla. Viimeinen pylväs on päätepylväs tai sähköaseman teline voimalinjan päättyessä sähköasemalle, johon johto päätetään. Liitteessä 2 on periaatekuva vapaasti seisovasta kannatus- sekä kannatuskulumpylväistä. Pylväsluetteloissa annetaan tarkat tiedot pylväistä sekä virtajohtimien jänneväleistä, joita tarvitaan muun muassa työssä johtosuureiden sekä impedanssiketjun laskennassa. (Elovaara & Haarla 2011, 264.)

2.3 Virta- ja ukkosjohtimien materiaali (OPGW)

Virtajohtimien tehtävä on kuljettaa tuotettu sähköteho voimalaitokselta kantaverkkoa pitkin asiakkaalle. Ukkosjohtimien tehtävät liittyvät nimensä mukaisesti johdon suojaukseen. Johtimet suojaavat virtajohtimia salaman iskuilta, kuljettavat maasulkuvirtaa reduktiovaikutuksen ansiosta, ja niitä voidaan käyttää tiedonsiirtoon, esimerkkinä SVY, eli suojauksen viestiyhteys distanssireleillä. Taulukossa 1 on kuvattu eri jännitetasojen tämänhetkinen johtopituus Suomessa sekä sähköasemien määrä. Suurin osa johdoista on 110 kV jännitetason siirtojohtoja.

Taulukko 1. Kantaverkon johtopituudet jännitetasoittain ja sähköasemat 3.3.2016 (Fingrid Oyj www-sivut 2016)

Jännitetaso	Johtopituus
400 kV	4600 km
220 kV	2200 km
110 kV	7600 km
Sähköasemat	116 kpl

Suurjänniteverkoissa siirtojohtojen yleinen valmistusmateriaali on teräsvahvisteinen alumiinijohdin ACSR ja teräsvahvisteinen alumiiniseosjohdin AACSR. Nämä Feraljohtimet muodostuvat kahdesta eri osasta. Johtimen keskellä sijaitseva teräsvahvistus parantaa johtimen mekaanista lujuutta. Näkyvä osuus muodostuu alumiinista. Kaikki suurjänniteverkon johtimet on standardoitu johtostandardeissa SFS 2430, SFS 3819 sekä SFS 4080. Teräsalumiinijohtimet on nimetty poikkipinta-alan mukaan eri nimiin, suluissa johtimen materiaalin pinta-ala (A_{Al} mm²/ A_{Fe} mm²). Keskijännitejohtimina käytetään Sparrow (34/6) , Raven (54/9) ja Pigeon (85/14), 110 kV johtimina Suursavo tai Suursavo strong (106/25), Ostrich (152/25), Hawk (242/30) Duck (305/39) ja Condor sekä 400 kV johtimena Finch (565/72) johtimia. (Elovaara & Haarla 2011, 278.)

Ukkosjohtimien materiaalilla ja johdinlajeilla ei ole merkitystä ilmastollisten ylijännitteiden suojauksessa, mutta ukkosjohtimilta haluttuun reduktiovaikutukseen sillä on merkitystä. Mitä paremmin ukkosköydet johtavat, sitä pienempi on reduktiokerroin, ja ukkosjohtimissa palaava prosentuaalinen osuus maasulkuvirrasta on suurempi.

Vaihtoehtoina voidaan käyttää teräsjohtimia 35-70 St tai edellä mainittuja teräsalumiinijohtoja. Näistä kaikki kestävät Suomen oloissa suurimmat maasulkuvirrat. Ukkojohtimia käytetään Suomessa lähes kaikilla 110 kV voimajohdoilla. Ukkojohtimien jättämistä pois voidaan harkita vain alueilla, joissa ukkosta ja sen johdosta maasulkuja esiintyy vähän, mutta joissa jääkuormat ukkojohtimissa aiheuttavat ongelmia. Tällainen tilanne esiintyy esimerkiksi Lapin maakunnan sammutetussa verkossa. (Elovaara & Haarla 2011, 32-33.) Vaihejohtimien virtalämpöhäviöt pitävät vaihejohtimet sulina, mutta ukkojohtimiin kertyvät lumi ja huurre voivat painaa ukkojohtimia liian lähelle vaihejohtimia aiheuttaen maasulkuja.

OPGW (Optical Ground Wire) on ukkojohtintyyppi, jonka putkimainen rakenne muodostuu sisäosan optisista kuiduista ja sitä ympäröivästä teräsalumiinilangoista. Tätä yhdistelmäjohtoa käytetään sähkönsiirtolinjoissa ukkossuojaukseen ja samalla tiedonsiirtoon. Optinen kuitu on itsessään eriste ja hyvin immuuni vieressä kulkevan voimajohdon tai salamaniskun induktiojännitteille. Optisia kuituja voidaan käyttää sähköyhtiön omiin tarkoituksiin voimajohdon suojaukseen ja valvontaan tai äänen ja datan siirtoon. OPGW johdon tiedonsiirtokapasiteettia voidaan hyödyntää myös kaupunkien välisissä nopeissa tiedonsiirtoyhteisissä. (Wikipedia 2016)

Opinnäytetyön suurjännitevoimajohdossa virtajohtimet olivat 3x2-305-AL1/39-ST1A "Duck" ja ukkojohtimet 1xAACSR 106/25 "Sustrong" + 1xOPGW.

2.4 Voimajohdon suojaus ja laukaisuajat

Vaarajänniteselvittelyissä sivutaan jatkuvasti voimajohdolla tapahtuvaa maasulkua ja sen poiskytkennässä käytettäviä laukaisuajkoja, joten seuraavaksi lyhyt katsaus johdon suojaukseen ja laukaisuajoihin. Voimajohdon suojauksessa käytetään distanssireleitä. Distanssirele on suojarele, joka kuuluu ali-impedanssireleisiin. Ali-impedanssireleet mittaavat releen ja vikapaikan välistä impedanssia johtolähdön alussa esiintyvien virtojen ja jännitteiden avulla. Tiedot tuodaan releelle johtolähdön virta- ja jännitemuuntajilta. Impedanssimittauksella distanssirele kykenee määrittämään etäisyyden vikapaikkaan. (Paukkunen, henkilökohtainen tiedonanto)

Vian sattuessa releessä oleva havahtumiselin havahtuu ja mittaa etäisyyden vika- paikkaan. Releestä löytyvä aikaelin hidastaa laukaisua tarpeen vaatiessa asetellun ajan verran. Distanssirele antaa laukaisukäskyn katkaisijalle esimerkiksi avata 110 kV johtolähtö. Distanssireleellä on laukaisut jaettu usealle vyöhykkeelle. Releen ensimmäinen vyöhyke asetellaan normaalisti kattamaan noin 85% suojattavan johdon pituudesta. Sen sanotaan olevan tällöin aliulottuva, ja se laukaisee vian 85% johdon etäisyydellä ensimmäisen vyöhykkeen laukaisuajalla, joka on 0,2 sekuntia mukaan lukien katkaisijan mekaaniset viiveet. Loppu 15% voimajohdosta laukaistaan pois 0,5s ajalla. (Elovaara & Laiho 1988, 396.) (Paukkunen, henkilökohtainen tiedonanto)

Distanssirelettä käytetään sekä oikosulku- että maasulkusuojana. Kumpikin vikatyypin vaatii omat havahtumiselimet. 400 ja 220 kV verkot ovat Suomessa tehollisesti maadoitettuja, mutta 110 kV verkko on maadoitettu vain osittain tiettyjen muuntajien tähtipisteiden kautta. Tällä ratkaisulla maasulkuvirrat saadaan pidettyä korkeina ja voimajohtoa suojaavat distanssireleet kykenevät toimimaan oikosulkujen lisäksi myös maasuluissa. (Elovaara & Haarla 2011, 338.)

3 SUURJÄNNITELAITTEISTOJEN MAADOITTAMISESTA

3.1 Maadoitukset sähkötekniikassa

Maadoitusten yleisenä tarkoituksena on yhdistää jokin laite tai virtapiiri maahan sähköä johtavan maadoituselektrodin avulla. Elektrodille ominainen maadoitusresistanssi arvo kuvaa maadoituksen tehokkuutta, eli kuinka hyvin vikavirta pääsee kulkeutumaan maahan. Tavallisimmin maadoituselektrodi on 70 cm syvyyteen kaivettu kuparinen köysi. (Elovaara & Laiho 1988, 413.)

Maadoitukset voidaan jakaa käyttö ja suojamaadoituksiin. Käyttömaadoituksessa virtapiirin osa yhdistetään maahan suoraan tai pienen impedanssin välityksellä. Sen tehtävänä on pitää virtajohtimien jännite maan suhteen sallituissa rajoissa vaara- ja vauriovaarojen näkökulmasta. Suojamaadoituksessa maahan yhdistetään virtapiirin jännitteelle altis osa. Suojamaadoituksilla estetään vaarallisen kosketusjännitteen syn-

tyminen kosketeltavaan jännitteelle alttiiseen osaan. (Elovaara & Laiho 1988, 413.) Jännitteelle altis osa määritellään standardeissa sähkölaitteen johtavaksi osaksi, jota voi koskettaa ja joka ei normaalisti ole jännitteinen, mutta voi tulla jännitteiseksi vian vuoksi.

Maadoitukset ovat tärkeä osa sähköjärjestelmää ja sähköturvallisuutta. Mukaan voitaisiin ottaa myös häiriönsuojaukset ja työmaadoittamiset. Tässä työssä kuitenkin perehdytään enemmänkin henkilöturvallisuuteen sekä normaalissa käyttötilanteessa että vikatilanteessa 110 kV voimajohdolla.

3.2 Turvallisuusnäkökohtia

110 kilovoltin voimajohdon maadoitussuunnittelun periaatteelliset lähtökohdat on kirjattu suoraan sähköturvallisuuslakiin 1996/410 5§, jota sovelletaan mm. sähkön siirrossa. Lain mukaan sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin että:

- 1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa
 - 2) niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä
 - 3) niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti
- (SFS-KÄSIKIRJA 600-3 2012, 9).

Toisaalta myös SFS 6001 + A1 + A2 suurjännitesähköasennukset standardi antaa vaatimuksia maadoitusjärjestelmän suunnittelulle. Maadoitusjärjestelmän on toimitettava kaikissa olosuhteissa, ja sen pitää varmistaa henkilöiden turvallisuus paikoissa, joissa ihmisillä on oikeus kulkea. (SFS käsikirja 601 2009, 78.) (SFS käsikirja 603 2009, 82.) Tämä johtaa myöhemmin kappaleessa 9.3 tarkasteltaviin kosketusjännitteelle ja maadoitusjännitteelle annettuihin raja-arvoihin. Ilmajohdoille on oma standardi EN-50341 ja sen kansallinen liite EN-50341-3-7, joita noudatetaan kuitenkin ensisijaisesti.

Maadoitussuunnittelulla haetaan turvallista ja käyttövarmaa järjestelmää. ”Turvallisuuden kannalta maadoituksissa pyritään pieniin maadoitusvastusarvoihin, jonka

avulla voidaan estää vaaralliset maadoitus- ja kosketusjännitteiden syntyminen” (Elovaara & Laiho 1988, 413).

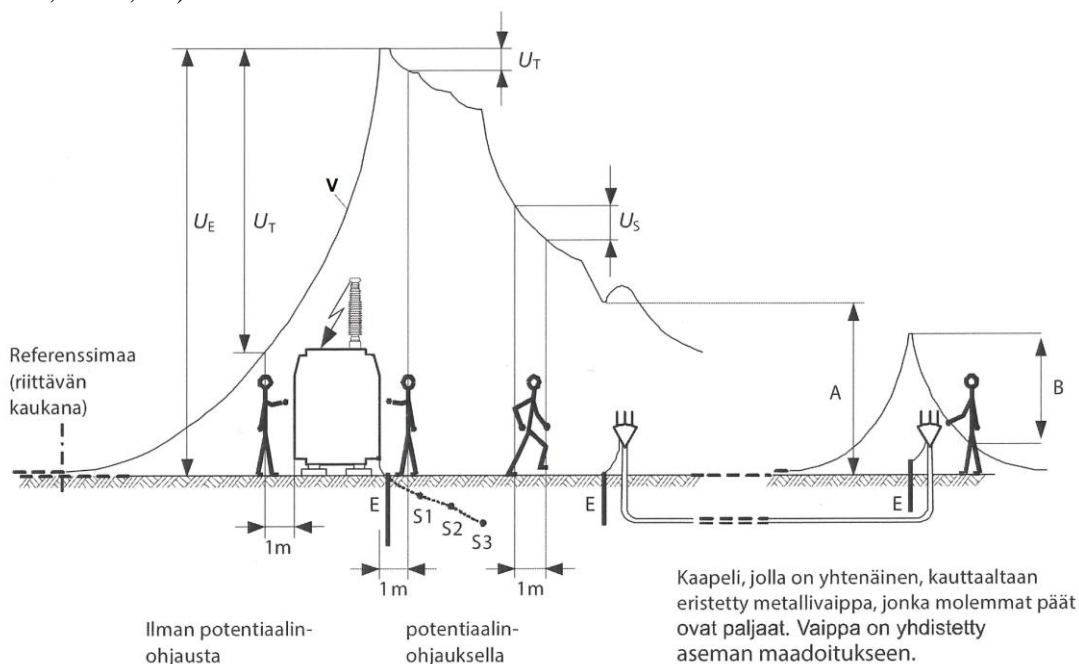
3.3 Maadoitus- ja vaarajännitteet

Suurjännitejohdon maasulkutilanteessa maanpinnan potentiaali kohoaa aiheuttaen vahinkoa viestintäverkon johdoille ja vaaraa ihmisille. Viestintäjohdon eristysrakenteet voivat vahingoittua jänniterasituksista tai johdinrakenteet (johdin, metallivaippa) lämpövaikutuksesta, jonka läpikulkeva vikavirta saa aikaan. Ihmisille koituu vaaraa erilaisista kosketusjännitteistä maasulussa olevan suurjännitepylvään läheisyydessä, tai maadoitusten kautta viestintäverkossa siirtyvinä kosketusjännitteinä tai takaperoisina jännitteinä. (VHV ohje 05, 13.)

Maadoitusjännitteiden ohella puhutaan siis useasti kosketusjännitteistä, askeljännitteistä, siirtyvistä jännitteistä ja takaperoisista jännitteistä. Kaikki ovat yhtä vaarallisia, ja niiden mahdollisuus on otettava huomioon sähköturvallisuustarkasteluissa. Yhteisesti näitä kaikkia nimitetään vaarajännitteiksi, joka on kuvaava nimitys juuri sähköturvallisuuden näkökulmasta. (Elovaara & Haarla 2011, 428.)

- Kosketusjännite U_T (touch) on se osa maasulusta johtuvaa maadoitusjännitettä, jonka ihminen saa virran kulkiessa kehon kautta kädestä jalkoihin (vaakasuora etäisyys jännitteelle alttiista osasta on 1 m).
- Askeljännite U_S (step) on se osa maasulusta johtuvaa maadoitusjännitettä, jonka ihminen saa 1 metrin askelvälillä virran kulkiessa kehon kautta jalasta toiseen.
- Siirtyvä jännite on maadoitusjärjestelmän jännitteen nousu, jonka aiheuttaa johtimen (esimerkiksi metallisen kaapelivaipan, PEN-johtimen, putkiston tai rautatiekiskon) siirtämä virta maahan alueelle, jossa on alhainen jännite tai ei jännitettä lainkaan. Tämä aiheuttaa jännite-eron johtimen ja sen ympäristön välille.
- Takaperoinen jännite määritellään johtimena, joka kytketään referenssimaahan ja tuodaan alueelle, jossa jännite on noussut. (SFS-KÄSIKIRJA 601 2009, 22.)

Kuva 3. Maanpinnan jänniteprofiili, kun maadoituselektrodeissa kulkee virta (SFS 6001, 2015, 26)



Sähkötekniikassa käytetään havainnollistavaa kuvaa (Kuva 3) maanpinnalla vaikuttavasta jänniteprofiilista vian aikana. Jänniteprofiili V kuvaa maanpinnan jännitettä eri etäisyydellä vikapaikasta. U_E on maadoitusjärjestelmän ja referenssimaaan välinen jännite. Kuvassa on kaksi eri tilannetta, jossa vasen puoli kuvaa tilannetta ilman potentiaaliohjausta, ja oikealla puolella potentiaaliohjaus on käytössä. Kuva 3 kertoo, että ilman potentiaaliohjausta kosketusjännite U_T on suuri, kun taas asennetuilla potentiaaliohjaus Elektrodeilla S_1 , S_2 , S_3 jänniteprofiili ohjataan kauemmaksi, ja se laskee vain vähän. Tällöin nojatessa laitteeseen vian aikana kosketusjännite jää pienemmäksi. Tämän vuoksi 110 kV pylväille tehdään potentiaaliohjaukset paikoille, joissa on vilkasta ihmisliikettä. Kuvassa näkyy myös askeljännitteen U_S ja siirtyvän jännitteen muodostuminen. Siirtyvä jännite voi olla kohtuullisen suuri, vaikka ollaan jo etäällä vikapaikasta.

Jänniteprofiili muuttuu jyrkästi vikapaikan läheisyydessä (esim. maasulussa oleva pylvä). Maasulun kohteessa vaikuttaa suurin kosketus- ja askeljännite. On huomattava, että kuitenkin vain osa maadoitusjännitteestä esiintyy vaarajännitteenä. (Elovaara & Haarla 2011, 429.)

4 VAARAJÄNNITTEIDEN KYTKEYTYMISTAVAT

Miten vaarajännitteet syntyvät ja mitkä ovat niiden kytkentämekanismit? Jännitteinen johdin luo ympärilleen sähkökentän, ja sen voimakkuus riippuu jännitteen suuruudesta. Kun johdossa siirretään tehoa, se muuttuu virralliseksi, ja virta luo johtimien ympärille magneettikentän. Voimajohdoilla siirretään suuria siirtotehoja. Käytössä ovat suuret jännitteet, jotta siirtohäviöt jäävät pieniksi, ja johdot vievät maastossa vähemmän tilaa. Jännitteistä ja virroista johtuen voimajohto heijastaa sähkömagneettisia vaikutuksia ympäristöönsä. Vaikutukset voidaan luokitella niiden luonteen ja seurausten, vaikutusaikojen sekä kytkeytymisperiaatteiden mukaan. (Välimaa, 1992, 2.)

Seurausten ja luonteen perusteella tapahtuvat vaikutukset jaetaan vaaran tai häiriön aiheuttaviin vaikutuksiin. Suurjännitejohdon aiheuttaessa vahinkoa ihmiselle tai laitteille, tulipaloriskin tai jopa automaattisesti korjautumattoman käyttökäytöksen, kyse on vaarasta. Häiriössä suurjännitejohto aiheuttaa viestintäverkon johdoille siirtokyvyn heikentymistä, joka havaitaan äänihäiriöinä tai virhesignaaleina. (Välimaa, 1992, 2.)

Ajallisesti voimajohdon aiheuttama vaikutus voi olla lyhytaikainen tai normaalikäyttöön liittyvä pitkäaikainen vaikutus. Lyhytaikaiset vaikutukset ovat alle 1 sekunnin kestoisia. Esimerkkinä voimajohdolla tapahtuva maasulku, joka laukaistaan pois automaattisesti 0,2-0,5 sekunnin aikavälillä. Vaikutusajan pituus vaikuttaa sallitun vaarajännitteen suuruuteen. Pitkäaikainen vaikutus merkitsee normaalikäytössä ilmeneviä vaikutuksia ja niiden arviointia. Seuraavissa alakappaleissa keskitytään tarkemmin kytkeytymisperiaatteisiin. (Välimaa, 1992, 2.)

4.1 Kapasitiivinen kytkeytyminen

Kapasitiivinen kytkeytyminen tapahtuu voimajohdon synnyttämän sähkökentän välityksellä. Kapasitiivisia vaarajännitteitä kutsutaan influenssijännitteiksi, ja niiden syntyminen vaatii viestintäverkon avojohdon tai metallisuojuksettoman ilmajohdon. Maan alla oleviin rakenteisiin se ei vaikuta. Suurjännitejohdon, viestintäjohtojen ja

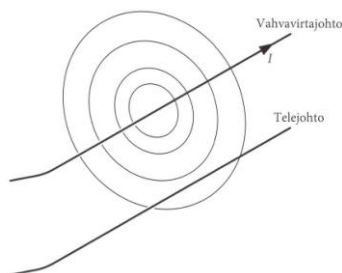
maan välille muodostuu osakapasitanssit. Kytkeä syntyy, kun osakapasitanssit suurjännitejohdon eri vaihejohtimiin ovat erilaiset, ja ne aiheuttavat epäsymmetrian, joka näkyy jännitteinä. Myöskään vaihejohtimiin muodostuva varausten summa ei ole nolla. (Välimaa, 1992, 3.)

Influenssijännitteiden teho on vähäinen, ja niitä voidaan verrata sähköstaattisiin ilmiöihin. Suurjännitejohdon normaalikäytössä influenssijännitteet ovat pieniä ja enintään satoja voltteja. Ne aiheuttavat lähinnä äänihäiriöitä sekä viestintäjohtojen suojaavien ylijännitesuojien turhan toiminnan, jolloin viestintäjohtojen dataliikenne kokee käyttökeskeytyksen. Ilmiöstä ei ole käytännössä haittaa, jos vain osa viestintäjohtojen ta kulkee voimajohdon vierellä. Käytännössä myös voimajohdon risteämät kumoavat vaikutuksen. Kapasitiivisten jännitteiden vaikutusalue ulottuu muutaman kymmenen metrin päähän suurjännitejohdon läheisyyteen, ja niiden merkitys on marginaalinen. (Elovaara & Haarla 2011, 466.)

4.2 Induktiivinen kytkeytyminen

Induktiivinen kytkeytyminen tapahtuu voimajohdossa kulkevan virran johdosta, joka synnyttää ympärilleen magneettikentän (Kuva 4). Suurjännitejohdon vieressä kulkeva viestintäverkon johto on osana magneettikenttää, ja voimajohdon aiheuttamasta magneettivuosta osa lävistää viestintäverkon johtoa. Kyseessä on muuntajakytkentä, jossa magneettivuoto indusoi viestintäverkon johtoon pitkittäisen sähkömotorisen voiman. (Välimaa, 1992, 2.)

Kuva 4. Periaatekuva induktiivisesta kytkeytymisestä. (Elovaara & Haarla 2011, 470)



Normaalikäytössä voimajohdolla kulkevat virrat ovat symmetrisiä ja virtojen vaiheero on 120° , jolloin viestintäverkon johtoihin indusoituvat sähkömotoriset voimat kumoavat pääosin toisensa. Tietyissä kohdissa johtimien etäisyydet viestintäverkon johtoihin voivat vaihdella, ja aiheuttavat pientä induktiovaikutusta. Toisaalta taas voimajohdoilla käytetty vaiheiden vuorottelu aiheuttaa vaihekulman muuttumisen 120° , ja tämä pitää huomioida sähkömotorisen voiman laskennassa. Myöhemmin induktioselvityksessä selvitetään Viestintäviraston laatimia raja-arvoja sallittuihin indusoituviin jännitteisiin sekä normaalikäytön että maasulun aikana. (Elovaara & Haarla 2011, 471.)

Maasulku 110 kV osittain maadoitetussa verkossa aiheuttaa suuret maasulkuvirrat, joiden taso voi ylittää useisiin kiloampeerin arvoihin. Maasulun aikaiset maavirrat aiheuttavat suuren induktiovaikutuksen. Maaperän johtavuus on Suomessa huono, jolloin maasulkuvirta leviää erittäin laajalle alueelle kulkiessaan kohti syöttävän aseman tähtipistettä. Maavirralla voidaan laskea ekvivalenttisyvyys kaavalla:

$$H = 658 * \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

ρ = maan ominaisresistiiivisyys

f = taajuus (50Hz)

Syvyydeksi H saadaan 4462 m verkon nimellistaajuudella ja maaperän keskimääräisellä johtavuudella. Syvällä kulkeva virta muodostaa ison virtasilmukan, joka taas aiheuttaa laajalle yltävän magneettikentän. (Elovaara & Haarla 2011, 472.) Maavirran vaikutus voi ulottua 10-15 km päähän ja tästä syystä induktioselvityksessä joudutaan selvittämään eri operaattoreiden viestintäverkon johdot laajalta alueelta voimajohdon molemmilta puolilta.

Indusoituva jännite on kaikista kolmesta kytketymistä yleisin. Se ei ole pelkästään maasulun aikainen ilmiö, joka vaikuttaa ainoastaan viestintäjohtoihin. Viime aikoina on kantaverkon johdoilla tapahtunut onnettomuuksia johtuen juuri induktion aiheuttamasta latausjännitteestä, jossa vierellä kulkeva suurjännitejohto on indusoinut jännitteen vierellä olevaan, huollon vuoksi, käyttöjännitteettömään suurjännitejohtoon. Voimajohdon päätyömaadoitus on tehty oikein, mutta eri syistä lisätyömaadoittaminen työkohteessa on joko laiminlyöty tai irronnut kesken työn. Näin ollen

johto on latautunut usean kilovoltin jännitteeseen ja hengenvaaralliseksi. Nykyisin vaaditaan kaksi lisätyömaadoitusta työkohteen läheisyyteen, jolloin toisen pettäessä henkilöturvallisuus ei välittömästi vaarannu. (Lehtonen, 2016)

4.3 Konduktiivinen kytkeytyminen

Konduktiivinen kytkeytyminen tapahtuu voimajohdosta siirtyvän maavirran virtauskentän välityksellä. Maasulkuvirta aiheuttaa vikapaikassa maan pinnan potentiaalinnousun, ja ukkosjohtimien välityksellä maasulkuvirta jakautuu useille pylvaille impedanssiketjussa. Silloin myös viereisten pylväiden potentiaalit nousevat. Viestintäverkon johdon sijaitessa alueella, jossa maan potentiaali on noussut, saattaa jännite päästä telejohtimiin ja siitä televerkkoon esimerkiksi läpilyönnin seurauksena. (Elovaara & Haarla 2011, 476.)

Konduktiivisten jännitteiden siirtyminen on suoraan verrannollinen maan pinnan potentiaaliin maasulussa. Jos potentiaalia saadaan laskettua, myös konduktiivisia jännitteitä kyetään rajoittamaan. Tässä kohden suurjänniteverkon maadoituksilla on suuri vaikutus, koska maapotentiaali on riippuvainen maadoitusvastuksesta. Maadoitussuunnittelun idea on suunnitella ja laskea pylvälle odotettu maadoitusresistanssi, joka olisi niin pieni, että maapotentiaali pysyisi standardin SFS 6001 sallimissa rajoissa. On huomattava, että konduktiivinen kytkeytyminen vaikuttaa maapotentiaalintarkastelussa sekä henkilöturvallisuuteen että viestintäjohtojen fyysiseen suojaamiseen. (Elovaara & Haarla 2011, 476.)

5 PYLVÄSMAADOITUKSET JA UKKOSJOHTIMET

5.1 Tehtävä

Voimajohdon pylväismaadoitukset ja ukkosjohtimet ovat yhdessä iso osa suurjännitteisen voimajohdon maadoitusjärjestelmää.

Pylväsmaadoituksilla on kolmenlaista tehtävää:

- maadoitukset vähentävät ukkoshäiriöitä kun pylvään potentiaalia saadaan pienennettyä. Tällöin pylvääseen tai ukkosjohtimeen osunut salama ei aiheuta takaiskua esimerkiksi pylväästä vaihejohtimiin.
- maadoitukset mahdollistavat maasulkusuojauksen ukkosjohtimettomalla johdolla ja parantavat suojauksen herkkyyttä myös ukkosjohtimellisella johdolla.
- maadoitukset pienentävät pylväspaikoilla maasulun aikana esiintyviä maadoitus- ja kosketusjännitteitä. (INSKO, 1976, 92-76 VII 2.)

Pylväsmaadoituksia suunniteltaessa kyseessä on kuitenkin sekä taloudellinen että turvallisuudesta riippuva optimointitehtävä. On huomattava, että maadoitusjännitteen lisäksi pylväsmaadoitukset vaikuttavat suuresti maasulkupotentiaalin leviämiseen maadoituselektrodien ulkopuolelle. Ongelmaksi saattaa muodostua ympäristön pienjännite- ja televerkkoihin leviävä jännite, joka ei ole hyvä asia. Huonossa maaperässä runsas maadoitus voi jopa huonontaa entisestään ympäristön tilannetta.

Ukkosjohtimilla on myös useita merkityksiä:

- Ne estävät sellaisten salamaniskujen osumisen vaihejohtimiin, joiden suuri virta riittää synnyttämään ylilyönnin.
- Johtimet ottavat osan maasulkuvirrasta siirrettäväkseen. Tällöin maadoituselektrodien kautta maahan kulkeutuu pienempi virta, jolloin sen synnyttämät maadoitusjännite, maapotentiaali sekä induktiovaikutus pienenevät. (reduktiovaikutus)
- Johtimet kytkvät vikapylvään tai sähköaseman rinnan toisten pylväiden kanssa, jolloin maasulkuvirran kohtaama impedanssi sekä maadoitusjännite pienenevät. (INSKO, 1976, 92-76 VII 1-2.)

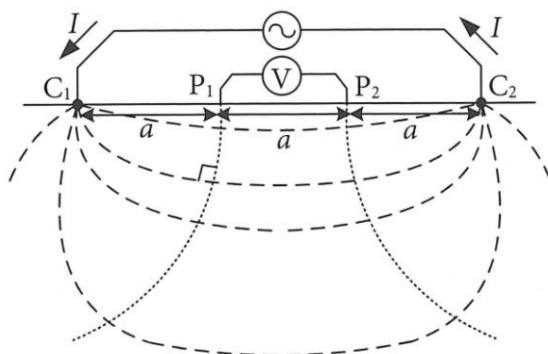
Rinnankytketyillä pylväillä saadaan salamasta aiheutuneita ylijännitteitä "ajettua" tehokkaasti maahan ja näin suojeltua sähköasemia jyrkiltä syöksyaalloilta. Salamankuista tai takaiskuista aiheutuneet ylijännitteet vaimenevat tai loivenevat koronasta, virranahdosta tai maapiirin vaikutuksesta tehokkaasti jo 2-3 km:n matkalla. (Elovaara & Haarla 2011, 32.)

6 MITTAUSTEN SUORITUS

6.1 Wennerin menetelmä

Opinnäytetyö käynnistyi varsinaisesti syksyn 2015 aikana, jolloin uusittavan suurjännitelinjan maaperän ominaisresistanssit selvitettiin mittauksin. Maaperän ominaisresistanssin mittaaminen on suurjännitepylväiden maadoitussuunnittelun perusta. Maan ominaisresistanssi on suure, joka kuvaa maaperän kykyä johtaa sähköä. Mittaukset toteutettiin neljän piikin menetelmällä eli niin sanotulla Wennerin menetelmällä. Mittauksessa käytettiin maadoitusmittaria, jossa on neljä eri piikkiä: kaksi virta- ja kaksi jännitepiikkiä. Piikit painettiin maahan riviin sille alueelle, josta maaperän vastusta haluttiin selvittää. Piikkien välisen etäisyyden a / [m] tuli olla paljon suurempi upotussyvyyteen nähden. (Elovaara & Haarla 2011, 454.) Kuva 5 selvittää mittaussperiaatetta tarkemmin.

Kuva 5. Maan ominaisvastuksen mittaussperiaate. (Elovaara & Haarla 2011, 455)

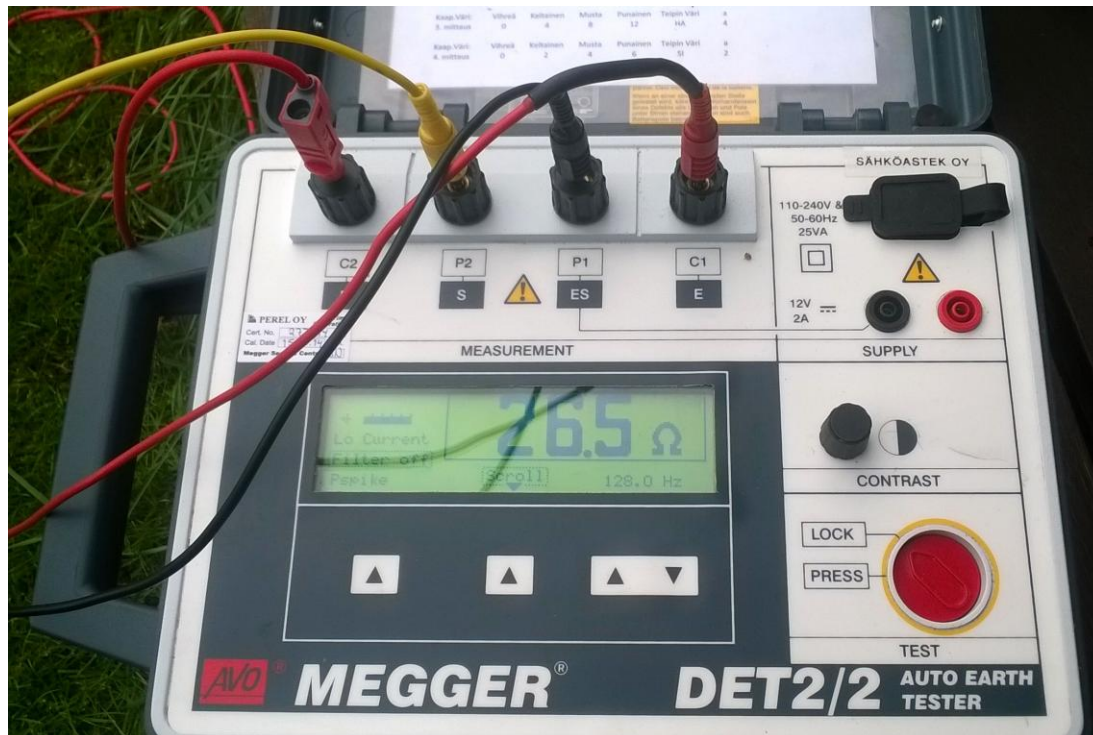


Virta syötetään maahan kuvan 5 piirissä C_1 -elektrodista, ja se palaa C_2 elektrodiin. Pisteiden P_1 ja P_2 välille muodostuvan potentiaalieron ja piiriin syötetyn virran osamääränä saadaan mitattu maadoitusvastus R_e / [Ω], jonka mittari kaiuttaa näytölle. Maan ominaisresistanssin arvo saadaan laskettua kaavasta $\rho = 2\pi a R_e$, jossa a = piikkien välinen etäisyys eri mittauksilla. (Elovaara & Haarla 2011, 454.)

Maaperä on sekalainen versio kaikenlaisia maakerrostumia. Se on hyvin harvoin ainesosiltaan homogeeninen. Tällöin ominaisresistanssin yhtälö antaa niin sanotun resaltoivan ominaisvastuksen syvyyteen a saakka. (Elovaara & Haarla 2011, 455.)

Voimalinjaa mitatessa käytettiin a:n arvoja 2, 4, 8 ja 16 metriä, jolloin saadaan kuvaan johtavuuden vaihteluista eri syvyyksillä.

Kuva 6. Mittauksissa käytetty MEGGER DET2/2 mittalaite



Ennen mittausreissulle lähtöä tehtiin neljä koemittausa, joissa testattiin laitteistoa, kokeiltiin laitteen eri toiminnot, ja kelloitettiin mittaukset.

6.2 Alustavat toimet ennen mittausa

Pitkän voimajohdon mittaus vaatii ennakkosuunnittelua. Mittauskohteen ollessa kaukana etäisyys tuo omat haasteensa. Tarvittava aineisto ja kalusto pitää olla valmiudessa.

Ennakkosuunnittelu aloitettiin esisuunnittelun lähtötietojen läpikäynnillä. Siihen kuuluivat kartalle piirretty uusi linja, voimajohdon pylväsluettelo, johtoaluekartat, vanha linja poistuvine pylväineen sekä alueen viestintäverkon operaattoreilta saadut tiedot. Kartoilla suunniteltiin alueella liikkuminen, suunnistus ja mittauksien suunnittelu.

Voimajohdon suunnittelussa sähkölaitos/voimajohdon suunnittelija ottaa yhteyttä alueella toimiviin teleoperaattoreihin. Vaara ja Häiriövaliokunnan ohjeen (myöhemmin VHV-ohje) mukaan teleoperaattoreiden täytyy luovuttaa tiedot 10 km:n säteellä johtoreitistä tietoja pyydettyäessä. Tiedot lisätään esisuunnitteluaineistoon käytettäväksi.

Operaattoreilta pyydetään koordinaatistoon sidottuna:

- viestintäverkon johtoreitit johtolajeittain
- asennustapa (onko johdot ilmassa vai maassa)
- asennuslaji (kuitujohto vai galvaaninen materiaali, esim. kuparijohto)
- johtotyyppi (esim: VMOHBU)
- maanalaiset ja maanpäälliset rakenteet eroteltuina
- keskitin alueiden nimet ja rajat
- keskittimien sijainnit
- jakamoiden ja muiden liitäntäpisteiden sijainnit

(Sorri, henkilökohtainen tiedonanto)

"Mittauksissa on varottava, ettei maassa ole kaapeleita, vesijohtoja tai rataakiskoja, jotka voivat oikosulkea osan maavirtapiiristä" (Elovaara & Haarla 2011, 455).

Uusi mitattava voimalinja sijoitetaan vanhalle johtokadulle, jolloin maaperässä on vanhojen pylväiden maadoituselektrodit. Jos mittaukset osuvat elektrodien päälle, mittaussiiri (maavirtapiiri) voi oikosulkeutua esimerkiksi orren kautta, ja mittaustuloksista saadaan liian hyviä (Imatran Voima 1973, 5). Elektrodien sijainti sekä vanhat mittausspaikat selvitettiin vanhoista pylväismaadoituspöytäkirjoista, ja piirrettiin CAD-ohjelmalla johtoalueesta tehtyyn kuvaan. Kuvaan liitettiin kaikki teleoperaattoreilta, vesilaitokselta sekä kaasuputkiryhtiöiltä saatu tieto referenssiksi, jolloin kaikki johtavat osat olivat kuvassa näkyvillä.

Kaikkea ei voi kuitenkaan suunnitella valmiiksi, ja osa harkinnasta tehdään vielä mittausspaikalla. Suurjännitevoimajohdon aukean sivustoja käytetään monesti 20 kV keskijännitejohtojen tai maakaapelien reittinä. Pylväissä on myös 20/0,4 kV jakelumuuntajia, ja huonosti johtavilla alueilla on jopa 20 kV pylväissä ukkosjohtimia. Tällaisista pylväistä ja varsinkin jakelumuuntajasta tulee alas maadoituskuparit, joten

kohteiden läheltä ei ole suotavaa ottaa mittausta. Ennalta tehty mittausten suunnittelutyö helpotti huomattavasti työskentelyä maastossa.

6.3 Mittauksien suoritus maastossa

Voimalinjan mittaukset tehtiin loka-joulukuun 2015 aikana. Uusi suunniteltava linja koostui 291 kappaleesta ennalta merkattuja pylväspaikkoja vanhalla johtokadulla. Jokaiselta pylväspaikalta otettiin yksi mittaustulos. Imatran Voiman ohjeen mukaan maan ominaisvastus mitataan pylvään molemmilta puolilta, sekä monesta kohtaa sieltä, mihin maadoituselektrodit ajatellaan asennettavan. Tämä siksi, jotta löydettäisiin paras maaperä maadoitukselle, ja samalla riittävän hyvä kuva maan ominaisvastuksesta. (Imatran Voima 1973, 5). Tässä työssä vanhaa linjaa oli jo mitattu vuonna 1988 huolellisesti useaan kertaan, joten maan ominaisuuksista oli etukäteen tietoa, eikä siten ollut tarvetta tehdä laaja-alaista mittausta. Vanhat tulokset olivat käytettävissä, ja uusia mittaustuloksia saattoi vertailla vanhojen kanssa. Omakohtainen havainto oli, että vanhalta mittausta paikalta tehty uusintamittaus näytti samaa arvoa. Tämä johtuu pitkälti siitä, että maan ominaisvastus ei muutu vuosien saatossa, ja kaikenlainen maamassan vaihto on kielletty johtokadulla. Uusia pylväspaikkoja oli kuitenkin jänteen välissä, joten pylvään läheisyydestä mitattiin yksi "tuore" otos.

Mittaukset tehtiin annettuja ohjeita noudattaen. Usein riittävä mittaus on keskeltä johtoauekaa poikittain tehty mittaus, paitsi jos jompikumpi puoli on huomattavasti paremmin johtavaa. Mittauspaikkoja ei myöskään saisi valita kaavamaisesti, vaan on käytettävä syvää harkintaa. (Imatran Voima 1973, 5) Maaperässä olevat nykyiset maadoitukset ja varsinkin läpimenevät maadoitukset pakottivat joissain tapauksissa ottamaan mittauksen suoraan keskijännteeltä. Turvallisuuden kannalta, maasulkuutilanteessa, poikittainen mittaustapa olisi kuitenkin parempi.

Mittauksissa käytettiin neljää eri piikkivälillä, jotka olivat $a = 2, 4, 8$ ja 16 metriä. Piikkivälit oli merkattu mittaushohtimiin, joten kaapeleiden levitys oli nopeaa. ”Piikit tulee painaa 10...15 cm syvyyteen ja a-mittojen tulee olla mahdollisimman tarkat ja samat, sillä epätarkkuudesta aiheutuva virhe on huomattava” (Imatran Voima 1973,

6). Omakohtaisena huomiona 2 metrin a-mitalla huomattiin mittavia heittoja, jos väli ei pysynyt tasaisena.

Mittausten aikana täytettiin pylväsmaadoituspöytäkirja, johon merkattiin:

- mittauspäivä ja mittajaan tiedot
- tiedot johdosta, jännitetaso ja pylväsnumero
- arvio maaperästä
- mittaustulokset
- mittauspaikka koordinaatistoon sidottuna
- hahmotelma maaston muodoista
- hahmotelma uusien maadoituselektrodien paikoista

Mittausarvot päivitettiin puhelimella pilvipalveluun, jossa oli valmiiksi tehty excel tiedosto datan keruuta varten. Taulukko laski suoraan maan resistiivisyyden arvot eri a:n arvoilla, joten mittaja sai eri kerrosten resistiivisyyden tietoonsa.

Maadoitussuunnittelua tehdessä on selkeä etu, jos mittajana ja suunnittelijana on sama henkilö. Paikan päällä tehty maaston havainnointi mittauksien aikana on suuri apu voimalinjan maadoitussuunnitelmaa tehtäessä.

6.4 Mittauslaitteiston huolto

Laitteet vaativat huoltoa. Mittauspäivän jälkeen mittari sekä mittakelat puhdistettiin ja kuivattiin huolellisesti. Mittakelat johtimineen olivat huonossa maastossa kovalla koetuksella. Mittakelat huollettiin, liittimet korjattiin, ja keloille tehtiin jatkuvuusmittaukset, jotta oltiin varmoja johtimien kunnosta. Varsinkin ilman kylmentyminen kohmetti johtimet, ja ne olivat herkkiä murtumille. Megger ilmoittaa virhekoodilla "Open circuit", jos virta/ jännitepiirissä on vikaa. Vian selvittäminen kesken mittauksen hidastaa työskentelyä valtavasti. Mittarin akku (12V DC) ladattiin aina yön aikana. Seuraavan päivän mittauksiin valmistauduttiin huolella, ja mitattavat pylväspaikat ja mittauspaikat mietittiin alustavasti.

6.5 Havaintoja mittauksista

Kuten opinnäytetyön alussa mainittiin, tilaajalle lähdettiin hakemaan kokemuksia suuren voimalinjan maadoitusmittauksista. Sitä saatiin runsaasti ja seuraavassa vain muutama yleishavainto.

Mittausten etenemistä seurattiin tiiviisti, ja yhteydenpito oli joustavaa. Lähtökohtaisesti kaikki mittauksesta saadut kokemukset, uudet ideat, laitteistokysymykset ja mitaustapahtuman optimointiin liittyvät asiat puitiin läpi puhelimitse joko maastossa tai maastosta paluun jälkeen, ja ne otettiin kokemuksena tulevaisuuden mittauksiin. Ongelmat ratkottiin tai korjattiin mittauspaikoilla itsenäisesti (lähinnä kovalle joutuneitten mittausjohtojen ja liittimien kunnostus).

Mittauksien suuri määrä oli iso haaste. Pylväsmäärä oli valtava, ja mittauksen taso täytyi pitää korkeana. Tarkka ja hyvin tehty mittaus kesti noin tunnin, joten päivässä pystyi tekemään 10-15 mittausta. Tämä on tärkeä tieto resursoinnin kannalta. Mittausmäärien ahminta näkyy hutiloimisena, mittajohtimien hajoamisena, kompastumisina, loukkaantumisina ja huonontaa työviihtyvyyttä.

Maastolla oli merkitystä mittausnopeuteen. Syyspuintien jälkeisten pelto-osuuksien mittaukset hoituivat nopeammin, kun taas peltojen syyskäntöjen jälkeen työ monimutkaistui, ja mittaus hidastui. Märkä savi paakkuuntui jaloissa sotkien mittalaitteet, johtimet ja mittaajan. Toisaalta riippuen vanhan johtoaukean raivaustilanteesta edessä saattoi olla täysin ryteikkö tai kaadetut puut. Molemmat näkyivät mittausajassa sekä johtimien rikkoutumisena. Korkeaksi venähtänyt pajukko löi silmille, mittausjohtimien veto ja piikkivälin tarkkaaminen hankaloituvat. Raivatuilla johtoaukeilla maahan jääneet ”kantotapit” olivat vaarallisia, ja kaadetut puut aiheuttivat kompaste-luita.

Sääolosuhteita ei voi valita, vaan päivän keli on mittauskeli. Olosuhteiden huononeminen näkyy mittausajassa. Sateinen syysilma aiheuttaa ongelmia lähinnä muistiinpanojen kirjaamisessa ja pylväspaikalla tehtävissä hahmotelmissa. Pakkaskeli kohmettaa mittajohtimet aiheuttaen murtumia. Aurinkoinen hellekeli lisää luonnollisesti nesteytyksen tarvetta. Syksyn puolelle ajoittunut mittaus säästi kesän itikoilta.

Mittaukset hoidettiin yhden miehen voimin. Tällä tavoin mittaus etenee hitaammin, ja pitkän voimajohdon mittaukseen kuluu aikaa kauemmin. Ongelmissa tai onnettomuustapauksissa keskellä metsää apu on kaukana. Kahden miehen partiolla päiväkohtainen etenemä on nopeampaa ja tarvittaessa tuki lähempänä. Toisen mittaajan voi jättää suoraan linjalle, josta hän kävelee linjaa pitkin koko päivän, eikä aikaa kulu auton siirtoon. Luonnollisesti ruokailutauot kannatti pitää maastossa. Ruokatauko luonnon helmassa on suomalaisen korpisoturin unelma.

7 MAADOITUSSUUNNITTELU

7.1 Maan ominaisresistanssien laskenta

Maaperän ominaisvastusmittausten ja maastotyöskentelyn jälkeen alkoi laskentatyö ja pylväskohtainen maadoitussuunnittelu. Suunnittelun perustana olivat maastossa tehdyt mittaukset ja niiden avulla laskettu maan ominaisresistanssi ρ [Ωm].

Suomessa maan ominaisresistanssit ovat hyvin suuria, kuten koko Fennoskandian alueella. Kallioperä ulottuu lähelle maan pintaa ja on usein kovaa graniittia. Lisäksi Suomea halkovat Salpausselän harjut, ja usein irtomaakin on hiekkaa ja soraa. Hiekka ja moreenisora johtavat vielä vähän sähköä, kun taas harjusora ja graniitti ovat jo todella huonoja johtavuudeltaan. (Elovaara & Laiho 1988, 416.)

Taulukko 2. Eri maalajien ominaisresistansseja (Elovaara & Laiho 1988, 416)

Aine	Keskimäärin Ωm	Tavallisimmat vaihtelurajat Ωm
Savi	40	25 ... 70
Saven sekainen hiekka	100	40 ... 300
Lieju, turve, multa	150	50 ... 250
Hiekka, hieta	2000	1000 ... 3000
Moreenisora	3000	1000 ... 10000
Harjusora	15000	3000 ... 30000
Graniittikallio	20000	10000 ... 50000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50 ... 500
Betoni kuivana	10000	2000 ... 100000
Järvi- ja jokivesi	250	100 ... 400
Pohja-, kaivo- ja lähdevesi	50	10 ... 150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1 ... 5

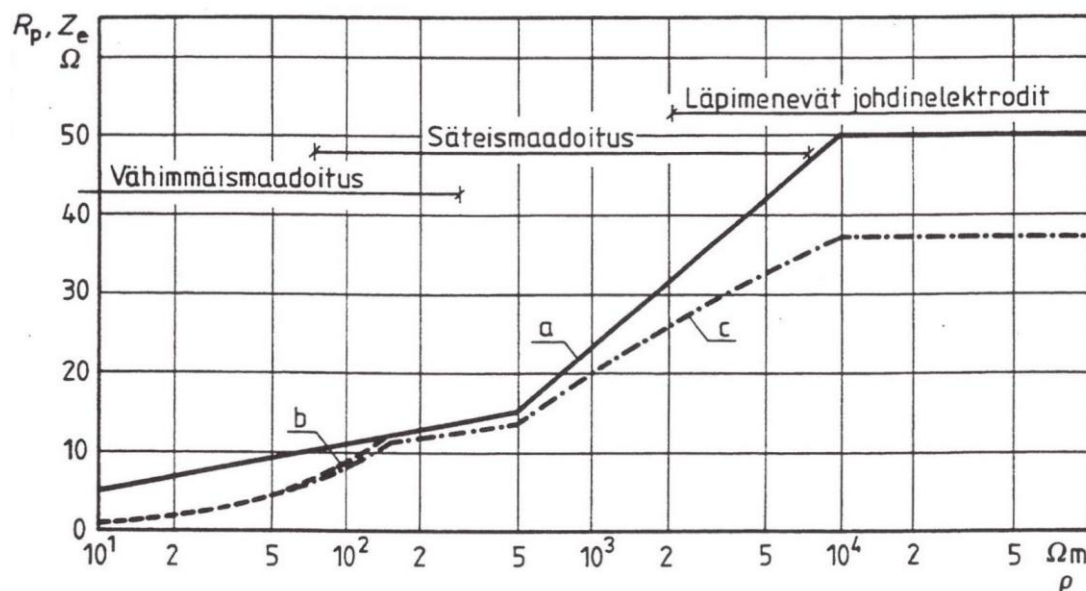
Pylväskohtaiset maan ominaisresistanssin arvot laskettiin kaavalla $\rho = 2\pi a R_e$, ja arvot taulukoitiin. Tuloksista otettiin käyttöön kolme, eli piikkiväleiltä 2, 4 ja 16 lasketut maan ominaisresistanssin arvot. Näistä kolmesta ominaisresistanssin arvosta laskettiin keskiarvo, jolloin käytössä oli kokonaiskuva maaperän johtavuudesta. Mittauksista saadut tulokset kertoivat paljon tulevan kohteen maadoitusolosuhteista. Mittaustulosten keskiarvo oli 9500 Ωm maan johtavuudelle, kun Suomessa keskiarvona pidetään 2300 Ωm . Kaikista 291:stä pylväästä 8 kpl jäi mittaamatta eli 2,7 %. Neljässä (4) tapauksessa uuden pylvään paikka oli asema-aitojen sisäpuolella, ja neljässä (4) tapauksessa keskellä avokalliota, jolloin mittausta ei suoritettu. Myöhemmin näiden pylväspaikkojen laskennassa käytettiin arvoja 2300 Ωm asema-aitojen sisäpuolisille pylväille sekä 30000 Ωm avokallioille, joka on graniittikallion ominaisvastukselle annettu keskiarvolukema.

7.2 Pylväsmaadoitusten tavoitearvojen ja tavoitekertoimen määrittäminen

Maadoitussuunnittelussa jokaiselle pylväälle lasketaan maadoitusresistanssin tavoitearvo, jota lähdetään tavoittelemaan erilaisilla maadoitusrakenteilla. Arvo on siis tavoitteellinen, ja sen saavuttaminen saattaa olla todella vaikeaa suurilla maan ominaisresistanssin arvoilla, kuten työn aikana havaittiin. Tavoitearvo on läheisesti riippuvainen maaperän ominaisresistanssista. Maan johtaessa hyvin pyritään parempaan maadoitusresistanssiin kuin huonoissa olosuhteissa. Voimajärjestelmien suunnitte-

lussa vanhat hyvät keinot ovat yhä käytössä, ja tavoitearvojen soveltamisessa käytetäänkin Imatran Voiman laskemia tavoitearvoja. (Elovaara & Laiho 1988, 421.)

Kuva 7. Pylväsmaadoitusten mitoittaminen 110-400 kV johdoille. Kuvassa a) esittää tavoitearvoja, b) perusmaadoituksella saatavaa keskimääräistä arvoa ja c) rezultoiva aaltovastus ukkosjohtimilla (Elovaara & Laiho 1988, 421)



Tavoitearvon määrittämisissä pylväille käytettiin edellisessä luvussa 7.1 laskettua maan ominaisresistanssien keskiarvoja piikkiväleiltä 2,4 ja 16. Eräällä pylväällä keskiarvon ollessa 1038 Ωm kuvan 7 taulukon a-käyrältä saadaan kyseiselle pylväälle maadoitusresistanssin tavoitearvoksi 23,5 Ω . Käytännön suunnittelussa tavoitearvojen määrittäminen on tehty excel-tilaukseen kaavalla, joka laskee jokaiselle pylväälle tavoitearvon saatuaan mittauksista maan resistiivisyyden keskiarvot.

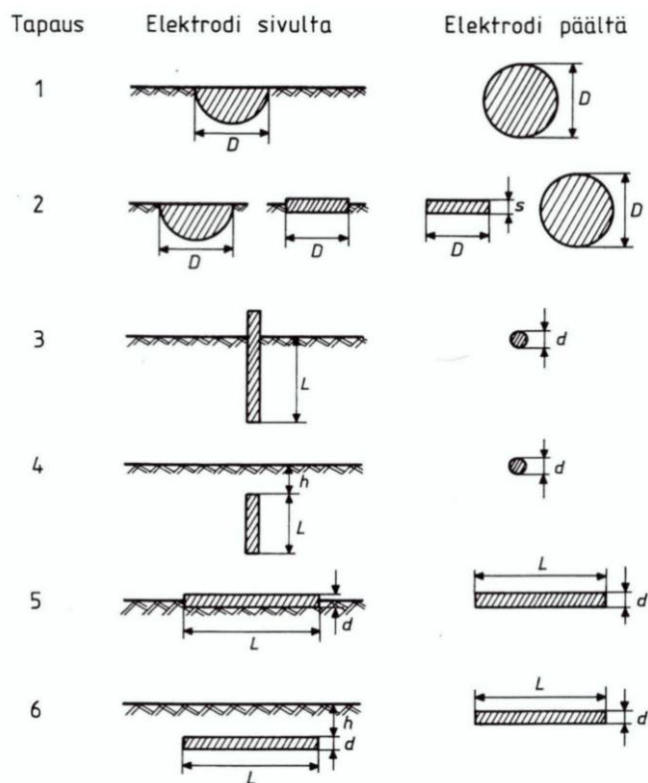
Laskennassa käytettiin kahta eri tavoitekerrointa 0,5 ja 1. Tavoitearvosta otetaan siis suunnittelutyöhön käyttöön lopulliseksi tavoitearvoksi 50% tai 100% riippuen tilanteesta. Voimajohtojen pylväsmaadoitussuunnittelussa pienempää tavoitekerrointa käytetään esimerkiksi asemien läheisyydessä 10 pylvään johdon kumpaankin suuntaan, jotta vältetään mahdolliset takaiskut. Samoin jos voimajohdosta erkanevat haaroja tai johdon varrella on pieniä sähköasemia, kaikkien näiden kohdalla käytetään myös pienempää arvoa 10 pylvään verran. Laskennassa saaduista tavoitearvoista otetaan näissä tapauksissa huomioon 50%. (Sorri, henkilökohtainen tiedonanto)

Työssä käsitelty johto-osuus oli haastava selvittelykohde. Sen varrella oli sähköasemia, rautatien syöttöasemia ja muita 110 kV haarautuvia johtoja. Sen vuoksi 139 pylväspaikalla eli 47% pylväistä jouduttiin käyttämään parempaa tavoitearvoa, jonka saavuttaminen oli vaikeaa muutenkin huonosti johtavassa maaperässä. Lopullisessa suunnittelussa ei kaikilta osin päästy tavoitearvoon, ja näin ollen hyvin johtavia paikkoja jouduttiin "ylimaadoittamaan".

7.3 Maadoitusresistanssin laskenta pylväälle

Suurjännitejohdon pylväismaadoitusten suunnittelun perustana on maan ominaisresistanssi ρ , johon maadoitusresistanssi R_e on suoraan verrannollinen. Maadoituselektrodin maadoitusresistanssi (R_e) on maadoituselektrodin ja referenssimaan välinen resistanssi (SFS-KÄSIKIRJA 601 2009, 22). Resistanssin laskentaa varten tarvitaan tieto maadoituselektrodin rakenteesta, jonka mukaan on määritelty laskentayhtälöt vaihtojännitteellä. Olettamuksena yhtälöissä on, että elektrodit upotetaan homogeeniseen maahan ja elektrodien poikkileikkaukset ovat pyöreitä. Kuvassa 8 on esitetty erilaisia maadoitusrakenteita. L tarkoittaa elektrodin pituutta, D elektrodin halkaisijaa ja h elektrodin upotussyvyyttä. (Elovaara & Haarla 2011, 433.)

Kuva 8. Maadoituksissa käytettyjä elektrodirakenteita. (Elovaara & Laiho 1988, 417)



Taulukko 3. Eri elektrodirakenteiden laskentayhtälöt. (Elovaara & Laiho 1988, 418)

N:o	Tapaus	Kaava	Huom.
1	Pallo pinnassa	$R = \rho / \pi D$	
2	Levy pinnassa	$R = \rho / 2 D$	$s \ll D$
3	Pystysuora tanko tai putki pinnassa	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36d}$	$d \ll L$
4	Pystysuora tanko tai putki upotettuna	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36d} \cdot \frac{2h+L}{4h+L}$	$d \ll L$
5	Suora johdin pinnassa	$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{2L}{1,36d}$	$d \ll L$
6	Suora johdin upotettuna	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85hd}$	$d \ll 4h$

Sähköastekin tilaamassa työssä käytettiin lähinnä taulukon 3 tapaista 6, jossa maadoituselektrodi on suora johdin ja aurattu maahan. Kyseinen tapa on taloudellisesti edullisin maadoitusrakenne. Elektrodin auraaminen maahan on metrimitalta halvempaa, kuin sen juntaaminen maahan useiden metrien syvyyteen. Muutamille peltopaikoille sekä hiekkaharjulle mitoitettiin pysty maadoitustangot, jolloin resistanssin laskennassa käytettiin tapauksen 3 yhtälöä. Voimalinjan suunnittelun lähtötiedoissa oli

valmiiksi annettu reunaehtoina maadoituselektrodin pinta-alalle $Cu\ 25\ mm^2$, jonka halkaisija $d = 6,4\ mm$. Elektrodin asennussyvyytenä käytettiin laskuissa $h = 0,7\ m$.

7.4 Perusmaadoitus ja maadoituselektrodien muodot

Suurjännitepylvään maadoitus rakentuu perusmaadoituksesta ja tarvittavasta lisämaadoituksesta. Perusmaadoitukseen kuuluvat perustusten rakennusvaiheessa asennetut niin sanotut J-lenkit sekä pylvään jalat yhdistävä kupariköysi. Näiden elementtien yhteisresistanssista käytetään nimeä pylvään luonnollinen resistanssi. Perusmaadoitus on myös vähimmäismaadoitus, joka tehdään aina pylväälle. Vähimmäismaadoitus on yleensä riittävä maadoitus maan ominaisresistanssien ollessa luokkaa 10-350 $\Omega\ m$. (Elovaara & Haarla 2011, 435.)

Luonnollisella resistanssilla päästään harvoin pylväälle laskettuun maadoitusresistanssin tavoitearvoon. Maan resistiivisyyden kasvaessa maadoitusta lähdetään parantamaan lisämaadoituksilla. Lisämaadoituksilla tarkoitetaan säteittäismaadoitusta, pysty- ja läpimenevää maadoitusta. Kuvassa 9 on esimerkit maadoituselektrodeista. Säteittäismaadoitusta käytetään maan ominaisresistanssien ollessa välillä 50-5000 $\Omega\ m$. Siitä ylöspäin suositellaan pylväältä toiselle läpimeneviä elektrodeja. (Elovaara & Laiho 1988, 422.)

Kuva 9. a) pylväälle tehty perusmaadoitus, b) neljällä viiksellä toteutettu lisämaadoitus + perusmaadoitus, c) pylväältä toiselle läpimenevä maadoitus. (Elovaara & Haarla 2011, 436)



Opinnäytetyössä turvauduttiin lisämaadoituksiin ja useimmiten upotettuihin vaakaelektrodeihin. Kyseessä oli pylväältä lähtevät elektrodisäteet, jotka merkataan suunnittelussa koodeilla 1R, 2R, 3R ja 4R, perusmaadoituksen ollessa BE, basic earth. Pylväältä voi siis lähteä 1-4 sädettä voimalinjan reunalla, johdon suuntaisesti, riippu-

en maadoitusolosuhteista tai pylvään läheisyydessä olevasta maastosta. Useimmiten säteet vielä yhdistetään päistään 20m pituiselle kuparijohtimella. Nykyisin läpimeneviä maadoituksia pyritään välttämään, sillä niiden pysyminen ehjinä koko lasketun käyttöiän on kyseenalaista. Maadoitusten ehjyys tulee varmistaa 6 tai 12 vuoden välein ja tämä on kallista.

7.5 Maadoituselektrodien suunnittelu pylväälle

Maadoitusten suunnittelu aloitettiin jo mittauspaikalla. Tässä kohtaa työssä on erittäin suuri etu, jos mittaaaja on samalla maadoitusten suunnittelija. Pylväspaikalta on selkeä kuva muistissa ja valmiiksi piirretty hahmotelma mahdollisesta maadoituksen toteuttamisesta. On aivan eri asia lähteä suunnittelemaan säteittäisten elektrodien lisäämistä, kun on itse nähnyt paikan päällä kallioiset jyrkänteet, suuret korkeusvaihtelut, avokalliot, suuret kivikkoiset rakat sekä asutuksen aiheuttamat ongelmat. Asutus mainitaan siksi, että aina ei ole tarpeen lähteä levittämään pylvään maadoitusjännitettä ympäristöön ja ihmisten pihoihin, jo vaarallisen askeljännitteenkkin vuoksi. Tarkastelu tulee esiin vaarajänniteselvityksissä, jossa on omat raja-arvonsa pienjännitemaadoituksiin ja viestintäverkkoihin siirtyville jännitteille.

Maadoituselektrodien suunnittelussa käytiin pylväspaikat läpi pylväs pylväältä. Suunnittelu oli aikaa vievä prosessi. Kaikille 291 pylväälle määriteltiin perusmaadoitus BE ja laskettiin pylvään luonnollinen resistanssi. Tietokoneohjelmaan on helppo lisätä vertailu tavoitearvoon pääsemisestä. Jos ja kun tavoitearvoihin ei päästy, lähdettiin yhdessä maadoitusresistanssin laskennan kanssa lisäämään pylväille säteittäismaadoituksia. Säteitten lisäämisessä käytettiin apuna kaikkea lähdetietoja sekä erityisesti mittauspaikalla tehtyä hahmotelmaa. Pylväälle lisättiin elektrodisäteitä, määriteltiin pituus, ja laskennan avulla seurattiin tavoitearvoon pääsyä. Elektrodien suunnittelua tehtiin myös loppuasentajan näkökulmasta. Minne olisi edullisinta ja helpointa tehdä maadoitukset?

7.6 Potentiaaliohjauselektrodin huomiointi

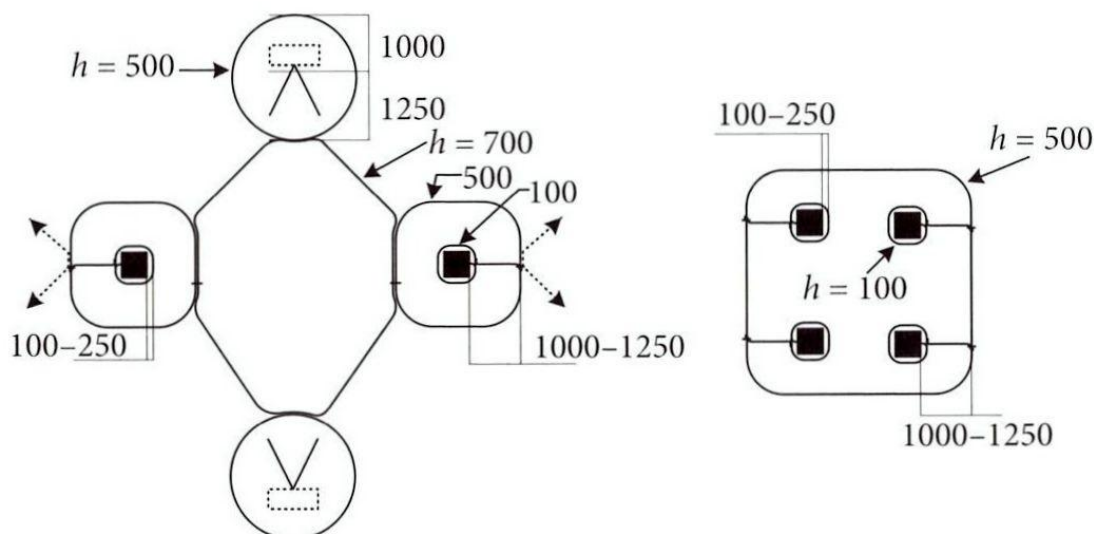
"Potentiaaliohjauselektrodi on johdin, jota käytetään muotonsa ja sijoittelunsa takia pääasiassa potentiaaliohjaamiseen eikä niinkään aikaansaamaan tietty maadoitusresistanssi" (SFS-KÄSIKIRJA 601 2009, 22).

Kappaleen 3.3 kuvassa 3 oli esitetty potentiaaliohjauselektrodien vaikutus. Tehtäessä potentiaaliohjaus suurjännitelaitteistolle tai tässä tapauksessa suurjännitepylväälle, maadoitusjännite pysyy lähes samansuuruisena kohteen läheisyydessä. Tällöin laitteistoa koskeva henkilö on samassa potentiaalientässä (esim. maasulkuvian aikana), jolloin vaarallista kosketusjännitettä eli jännite-eroa ei pääse syntymään. Kuvan 3 maadoitusjännitteen käyrästä näkyy, että potentiaalia ohjaamalla maadoitusjännitteen suuruus pysyy lähes yhtä suurena metrin etäisyydellä.

Standardi SFS 6001 + A1 + A2 suurjännitesähköasennuksille antaa ohjeen potentiaaliohjauselektrodin käytöstä:

"Jos pylväs sijaitsee paikalla, jossa usein oleskelee ihmisiä tai kotieläimiä, on maadoitusjärjestelmässä oltava lisäksi toinen potentiaaliohjausringas, joka sijaitsee n. 1m etäisyydellä ensimmäisestä elektrodista ja korkeintaan 0,7m syvyydellä. Paikoina, joissa usein oleskelee ihmisiä pidetään mm. rakennuksia ympäristöineen ja tonttialueineen, liikenneväyliä ja urheilukenttiä ja vastaavia vapaa-ajan viettoalueita" (SFS-KÄSIKIRJA 601 2009, 101).

Kuva 10. Potentiaaliohjauselektrodien mitoituskuvat harustetulle porttaalipylväälle (vas.) sekä vapaasti seisovalle pylväälle (oik.) (Elovaara & Haarla 2011, 436)



Suurjännitepylväiden maadoitussuunnitelmassa otettiin huomioon edellä mainitun standardin vaatimus potentiaaliohjauselektrodeista. Jokainen pylväspaikka käytiin huolellisesti läpi ja arvioitiin potentiaaliohjauksen tarvetta. Suunniteltavan voimalinjan oheen sijoittuivat koulu, päiväkotia, urheilukenttä, lenkkeilypururata, kaupungin vihheralue, kevyen liikenteen väyliä, taajamia sekä alueita, joissa laskettiin ihmisten oleskelevan useita tunteja päivässä. Yhteensä 39 pylväälle eli 13,4% pylväslukumäärästä suunniteltiin potentiaaliohjauselektrodit henkilöturvallisuuden lisäämiseksi.

Potentiaaliohjauselektrodit huomioidaan myös maapotentiaaliselvityksissä. Jos maadoitusjännite on välillä $2 * U_T \leq U_e \leq 4 * U_T$, joudutaan tekemään määräysten mukaan erityistoimenpiteitä sisä- ja ulkoasennuksissa. Yhtenä erityistoimenpiteenä on juuri asentaa potentiaalia ohjaavat elektrodit. Kosketusjänniterajoja U_{TP} on käsitelty enemmän luvussa 9.3.

7.7 Maadoitusten yhdistäminen ja putkittaminen

Käytettäessä vanhaa voimalinjan johtokatua uudestaan maaperästä löytyy vanhoja kuparielektrodeja, kuten mittausosiossa 6.2 todettiin. Maadoituksia suunniteltaessa nämä otettiin huomioon mahdollisuuksien mukaan. Linjalla kulki useiden pylväiden

matkalla vanhat 70 mm² kuparielektrodit ns. läpimenevinä maadoituselektrodeina, joihin oli kytketty sekä suurjännitepylväät että eräiden sähköasemien maadoitukset. Ilmeisesti aseman oma maadoitusimpedanssi oli aikoinaan jäänyt niin suureksi, että kosketusjännitteiden pienentämiseksi aseman maadoituksia oli paranneltu lähellä menevän voimalinjan johtokadulle, jossa oli pehmeää ja hyvin johtavaa suomaastoa. (Sorri, henkilökohtainen tiedonanto)

Uuden linjan maadoituselektrodit yhdistettiin vanhoihin elektrodeihin, jos ne olivat sopivasti käytettävissä ja löytyivät pylväsmaadoitusten rakennusvaiheessa. Yhdistykset kirjattiin suunnitelmaan ja pylväsikohtaisiin maadoituspöytäkirjoihin, joten ne ovat tiedossa. Näitä vanhoja maadoituselektrodeja ei otettu huomioon laskuissa, vaan tulevaisuudessa ne toimivat korkeintaan parantavasti voimalinjan pylväiden maadoitusimpedansseja mitatessa.

Voimalinjan maadoituselektrodit asennetaan kaikki avattavin liitoksin. Pylväs voidaan siis myöhemmin irrottaa maadoitusjärjestelmästä pylvään maadoitusimpedanssin mittausta varten. Mittauksessa mitataan pylvään oman maadoituselektrodirakenteen maadoitusimpedanssi. Sen vuoksi pylväsmaadoitukset halutaan luotettavasti erottaa niin pylvään ukkosjohtimista kuin kaikista ulkoisista maadoitusten yhdistämisistä. Maadoitusten yhdistämisessä käytetään PVC muoviputkea, jonka läpi maadoituselektrodi viedään ennen suurjännitepylvääseen yhdistämistä. Elektrodi putkitetaan sen vuoksi, ettei se häiritse pylvään maadoitusimpedanssin mittausta.

Voimalinjan maadoituksia suunniteltaessa yhdistämiset ja putkitukset otettiin huomioon. Suunnitelmassa varauduttiin jo ennalta näihin myöhemmin tehtäviin mittauksiin, ja putkitukset mietittiin huolella yhdistyksiin. Yhdistämisissä käytettiin vahvuudeltaan 25 mm² Cu köyttä.

Voimajohdolta lähtevien risteävien pylväiden ukkosjohtimet yhdistettiin myös voimalinjan maadoituksiin. Ukkosjohtimet ovat molemmissa linjoissa tuotu maadoituselektrodilla alas pylvään juurelle, joten nämä pisteet yhdistettiin toisiinsa järeämällä 70 mm² Cu köydellä.

7.8 Tarvittavan materiaalin seuranta

Maadoitusten suunnittelussa ja toteutuksessa maaperään suunnitellaan ja asennetaan maadoituselektrodirakenteen vaatima materiaali. Perusmaadoitukset, lisämaadoitukset ja potentiaalinohjauselektrodit tehdään vahvuudeltaan 25 mm² Cu köydellä. Pylväismaadoitusten yhdistäminen muihin maadoituksiin tai risteävän linjan maadoitukseen vaaditaan tapauskohtaisesti joko 25 tai 70 mm² vahvuiset kupariköydet. Maadoitusten erottamisnäkökulmasta osa maadoituksista varustetaan PVC muoviputkella. Pystymaadoitukset voidaan tehdä joko kupariköydellä tai kuparitangoilla.

Maadoitussuunnittelussa lasketaan tarvittavan materiaalin määriä kumuloituvasti. Pylväspaikkakohtaisesti maadoitussuunnitelmaan kirjataan pylväspaikalla tarvittava materiaali, josta lisää dokumentointiosiossa. Tietokoneella tehty maadoitussuunnitelmaohjelma osaa laskea tarvikkeiden menekin, ja se saadaan myöhemmin kirjattua maadoitussuunnittelun yleistietoina. On tärkeitä, että suunnittelun tuloksena osataan antaa tieto tarvittavan materiaalin kulumisesta, koska näin voidaan urakointivaiheessa laskea materiaalista aiheutuvat kustannukset.

7.9 Maadoitussuunnitelman dokumentointi

"Maadoitusjärjestelmästä tulisi olla käytettävissä asemapiirros, josta selviää maadoituselektrodien materiaali ja sijainti, elektrodien haaroituspisteet sekä asennussyvyys" (SFS-KÄSIKIRJA 601 2009, 119).

Maadoitussuunnittelun laskennan tuloksena piirrettiin jokaiselle 291 pylväspaikalle liitteen 3 mukainen "laajennettu" asemapiirros. Sisällöltään se vastaa kokonaisuudessaan vanhaa pylväismaadoituspöytäkirjaa digitaalisessa muodossa. Tämä on lopullinen piirros maadoituksen toteuttamisesta, ja sitä voidaan käyttää sellaisenaan maadoitusten rakentamisvaiheessa. Piirros tehtiin A3 kokoiselle kehykselle, ruudukoituina 1:500 mittakaavaan eli yhden ruudun koko luonnossa oli 5 x 5 metriä. Piirrokseen lisättiin ilmansuuntaa kuvaava pohjoisnuoli. Asemapiirroksen pohjalla oli kaikki lähdeaineistossa saatu dgn-muotoinen tieto (kuvattu edellä), joka kytkettiin samaan kuvaan referensseinä.

Piirros antaa visuaalisuudellaan selkeän kuvan pylväspaikan tilanteesta. (Liite 3). Kuvaan piirrettiin pylväsalkojen sijainti sekä harusten paikat. Maadoituselektrodien sijainti aloitettiin piirtämällä pylväsjalat yhdistävä perusmaadoitus (BE). Tämän jälkeen kuvaan piirrettiin maadoitussuunnitelmassa lasketut lisämaadoitukset metrin tarkkuudella. Lisämaadoitukset ovat pylväsjaloilta lähteviä elektrodisäteitä, jotka ovat muotoa 1R, 2R, 3R tai 4R. Piirroksessa kuvattiin myös säteiden yhdistäminen päistään 20m kuparielektrodilla, jos näin oli suunniteltu.

"Jos sallittujen kosketusjännitteiden saavuttamiseksi tarvitaan erityistoimenpiteitä, ne on sisällytettävä asemapiirroksen ja kuvattava dokumentoinnissa" (SFS-KÄSIKIRJA 601 2009, 119). Tämän vaatimuksen johdosta asemapiirroksen piirrettiin potentiaalinojauselektrodit.

Johtoaukean reunoilla kulki vanhoja 70 mm² kuparielektrodeja. Suunnitellut uudet maadoitukset tullaan yhdistämään näihin C-liittimillä, ja yhdistäminen on kuvattu asemapiirroksessa. Myöhemmin tehtävää pylvään maadoitusresistanssin mittausta varten yhdyskupari täytyy putkittaa PVC-muoviputkella sekä valmistaa avattavalla liitoksella, jotta pylvään oma maadoitus saadaan erotettua luotettavasti muista maadoituksista. Myös PVC putkitukset näkyvät piirroksessa.

Kuva 11: Pylväspaikkakohtainen tietolaatikko kaikkine tietoineen.

Mittaukset pvm: 15.12.2015		Mittaaja: Jori Fager/S-tek		Mittaustek Oy				Kontrollimitaus: Pvm / Mittaaja _____ / _____ 20 _____			
Suunniteltu pvm: 11.2.2016		Suunnittelija: Jori Fager/S-tek		Luonnollinen res. R _{mi} = 100 Ω		Tavoitearvo %: 50 R _T = 9,2 Ω		R _m = _____ Ω <input type="checkbox"/> sarjam. <input type="checkbox"/> jännite-virtamittausm			
Pika:		A		B		C		D		Maan ominaisr. ka	
Maa:		multa, pello									
a	R	ρ _s	R	ρ _s	R	ρ _s	R	ρ _s	mittaus paikka	ρ _s	Jalkimitaus:
m	Ω	Ωm	Ω	Ωm	Ω	Ωm	Ω	Ωm		Ωm	a/m
1	0	0	0	0	0	0	0	0	ka	666	20
2	20,7	260	0	0	0	0	0	0	A	666	40
4	10	251	0	0	0	0	0	0	B	0	60
8	7,2	362	0	0	0	0	0	0	C	0	80
16	14,8	1488	0	0	0	0	0	0	D	0	100
Maadoitussuunnitelma:				Maadoitustyö:				R/Ω			
Odotettavissa R _{so2} / R _{so1}				Vaimistunut: _____ / _____ 20 _____				R _m = _____ Ω <input type="checkbox"/> 60 / 40 m <input type="checkbox"/> 100 / 63 m			
25	mm ²	Cu	-köytä:	260	m					Pvm / Mittaaja _____ / _____ 20 _____	
70	mm ²	Cu	-köytä:	0	m					R _m = _____ Ω <input type="checkbox"/> sarjam. <input type="checkbox"/> jännite-virtamittausm	
Eristysmuoviputkea (PVC): 20 m				Muoviputkea (PVC) _____ m				I _k = _____ mA U _o = _____ V			
Huom.		Parempi kuin tavoite		Elektr.: 4R		Huom. _____				Pvm / Mittaaja _____ / _____ 20 _____	
4x 40m sädettä yhdistetään päistään, kytketään pylväs vanhoihin sivukupareihin Cu25:lla. Liitosköydet eristetään putkittamalla pylväällä 10m matkalla ja tehdään avattavat liitokset.										R _m = _____ Ω <input type="checkbox"/> sarjam. <input type="checkbox"/> jännite-virtamittausm	
										I _k = _____ mA U _o = _____ V	
Logot poistettu		Työ nro:	Lopull. no:	Pylv. Laji:		Juuripaalan koordinaatit:		GK27_N2000			
		125	125	1Y		X:		Y:	Z:	6219778,303 23462082,345 87,243	
Logot poistettu		[Suunnittelutunnus] [JOHTOVÄLI] 110 kV						PYLVÄSMAADOITUSPÖYTÄKIRJA			

Asemapiirroksen oikeaan alareunaan tuotiin laskennassa tehty (kuvan 11) pylväskoh-
tainen kooste tietolaatikkona, johon oli kerätty kaikkein olennaisin tieto maadoituk-
sesta sisältäen:

- voimalinjan nimi ja suunnittelutunnus (sutu)
- pylvään numero, pylvästyyppi ja juuripaalun koordinaatit X,Y,Z-tasossa
- mittauspäivämäärä ja mittaajan nimi
- suunnittelupäivämäärä ja suunnittelijan nimi
- pylväspaikalla tehty arvio maaperän lajista
- mitatut maan vastusarvot R_m piikkiväleillä $a = 2, 4, 8$ ja 16 metriä
- vastusarvojen perusteella lasketut ominaisresistanssin ρ arvot eri piikkiväleillä
- maan ominaisresistanssien keskiarvo
- pylvään luonnollinen resistanssi R_{luonn}
- tavoiteltavan resistanssin arvo R_T koko pylvääälle
- tavoitearvo prosentilla esitettynä
- oletettava lopullinen maadoitusresistanssin arvo
- kupariköyden menekki metreinä, eroteltuna johdinaloille 25mm^2 ja 70mm^2
- PVC-putken menekki metreinä
- maadoituselektrodin muoto (BE/1,2,3,4R)
- toteamus tavoitearvon ylityksestä tai alituksesta
- sanallinen selitys maadoituksen toteutuksesta

8 MAAPOTENTIAALIEN LASKENTA

8.1 Pahin vikatapaus huomioidaan

Laskettaessa pylvääille maadoitusjännitteitä sekä maan potentiaalia pylväiden ympä-
ristössä tarkastelun kohteena on aina pahin vikatapaus. Suurjännitepylväillä pahin
vikatapaus henkilöturvallisuuden kannalta on aina pylväällä tapahtuva yksivaiheinen
maasulku, jota laskennassa tarkastellaan. (VHV ohje -05, 6) Lisäksi 2- ja 3-vaiheiset
oikosulut ovat mahdollisia, jotka ovat taas rakenteille kaikkein pahimmat mutta ei

niinkään henkilöturvallisuudelle. Näille tapauksille terminen sekä oikosulkuvoimien tarkastelu kuuluu yleissuunnitelmaan (pylväs rakenne). (Sorri, henkilökohtainen tiedonanto)

Suurjännitejärjestelmän maasulkuvika synnyttää johtavan yhteyden päävirtapiirin vaihejohtimien ja maan tai maadoitetun osan välille. Yhteys voi syntyä myös valo-kaaren kautta. (SFS-KÄSIKIRJA 601. 2009, 25) Voimajohdon maasulussa maasulkuvirta kulkeutuu maahan maadoituselektrodien kautta, jolloin maan potentiaali nousee pylväiden läheisyydessä verrattuna referenssimaana pidettyyn puhtaaseen maahan. Potentiaalın nousu aiheuttaa vaaraa ihmisille ja eläimille, minkä vuoksi voimajohdon suunnittelun yhteydessä lasketaan ja tarkastellaan maapotentiaaleja sekä niiden leviämistä ympäristöön vikatilanteessa. (VHV ohje 05, 3-4)

Suurjännitejärjestelmän yksivaiheinen maasulku ja sen aiheuttama maapotentiaalın nousu ovat käytännössä tarkastelujen perustana. Kaksoismaasulut ovat harvinaisia ja erittäin epätodennäköisiä johtuen suoraan maadoitetusta verkosta, joten niihin ei yleensä varauduta laskelmin. Suoraan maadoitetun verkon etu on myös terveiden vaiheiden pieni jännitteenousu ja nopea laukaisu jännitteettömäksi. (VHV ohje 05, 4)

Maadoitusjännite eli potentiaali pylväällä määräytyy suoraan sähköteknisestä peruskaavasta: $U_e = I_e * Z_e$, jossa I_e on maadoituksen kautta maahan menevän virran osuus ja Z_e on se impedanssi, jonka maavirta kohtaa. Myöhemmin käytetään I_e paikalla ekvivalenttista maasulkuvirtaa kerrottuna reduktiokertoimella.

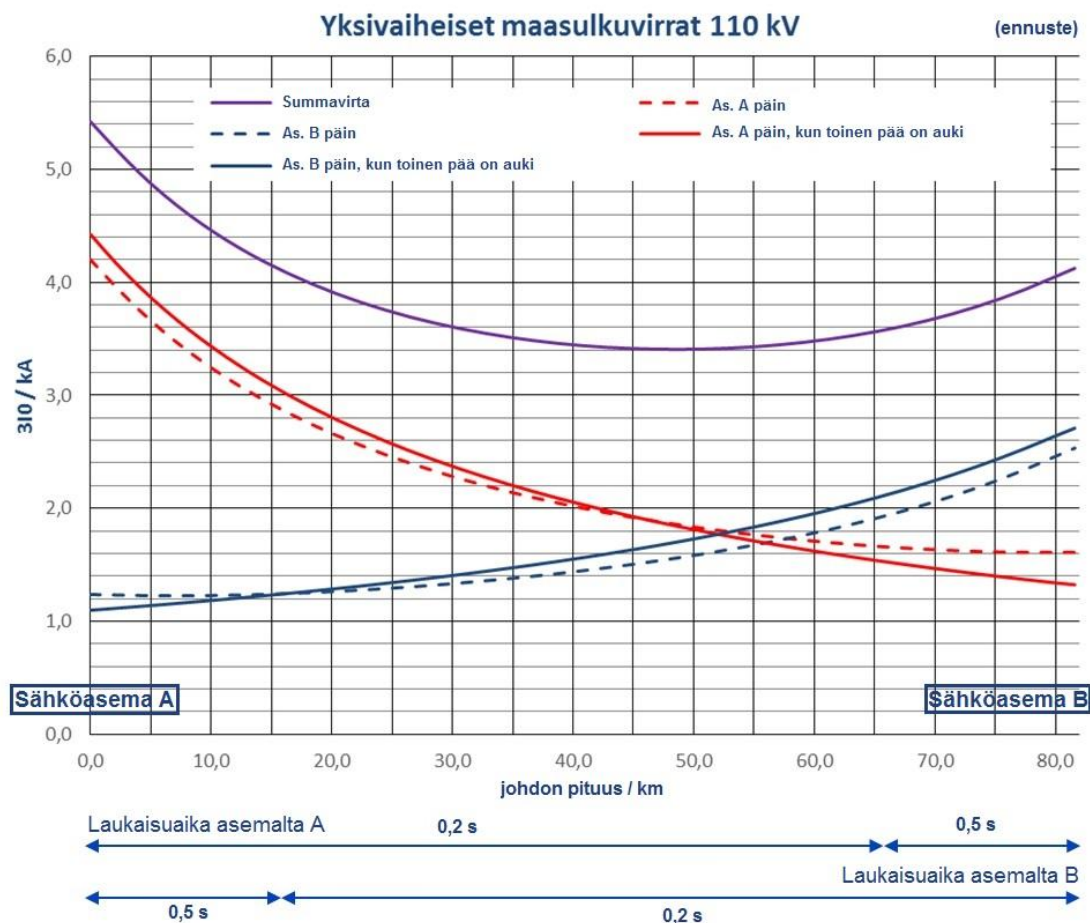
Seuraavissa kappaleissa otetaan kantaa siihen, mitä erilaisia näkökohtia on otettava huomioon pylväs kohtaista maapotentiaalilaskentaa tehtäessä.

8.2 Maasulkuvirtojen redusointi pylväspaikoille

Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid pitää yllä verkkomallia Suomen kantaverkosta. Voimalinjan suunnittelun lähtötietoina Fingrid tai alueverkon omistaja toimittaa

pyydettyä tiedot maasulkuvirroista ja niiden laukaisuajoista suunnittelijoille. Virroissa on otettu huomioon lähivuosien kasvuennuste.

Kuva 12: Erään asemavälin yksivaiheiset maasulkuvirrat 110 kV johdolla.



Maadoitusjännitteen vaikutusaika määräytyy maasulun kestoajan mukaan. Kuten jo kappaleessa 2.4 kuvattiin, kestoaja määräytyy vyöhykkeiden mukaan, joka on ensimmäisellä vyöhykkeellä 0,2 s ja toisella 0,5 s. Maasulku voidaan laukaista pois portaittain riippuen syöttösuuntien erilaisista laukaisuaikojen asetteluista. Tästä syystä johdon keskiosalla vika kytetään pois aina 0,2 sekunnissa riippuen syöttösuunnasta, mutta johdon päissä saattaa tilanne olla se, että toinen asema laukaisee vian 0,2 ja toinen 0,5 sekunnin kuluttua. (VHV ohje 05, 6.)

Eri laukaisuajat vaikuttavat laskelmissa käytettäviin maasulkuvirtoihin, ja voimalinjan laskuja varten muodostetaan ekvivalenttinen maasulkuvirta, joka redusoidaan pylväspaikkakohtaisesti. Se ei ole todellinen maasulkuvirta, vaan siinä on otettu

huomioon laukaisuajat, ja yhdistetty neliöllisesti ajallisesti painotetut osa-aika-arvot. Kaavana voidaan kirjoittaa:

$$I_{ekv} = \sqrt{\frac{t_1 I_{t_1}^2 + t_2 I_{t_2}^2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots}}, \text{ jossa } t_1 = 0,2s \text{ ja } t_2 = 0,3s \quad (\text{VHV ohje 05})$$

Maadoitusjännitetarkasteluissa laskettiin jokaiselle 86 km asemavälillä olevalle suurjännitepylväälle oma ekvivalenttinen vikavirta. Laskelmissa paloiteltiin yllä oleva kuvan 12 epäsymmetriapiirros numeeriseen muotoon pylväspaikoille etäisyyden mukaan lähtien sähköasemalta A. Lähtötiedoissa saatujen pylväiden jännevälien avulla maasulkuvirran arvot saadaan tarkasti redusoitua jokaiselle pylväälle, ja näitä virtoja käytetään laskettaessa pylväille maadoitusjännitteen arvo yksivaiheisen maasulun aikana.

8.3 Johtosuureiden laskenta

Suurjännitepylväillä vaikuttava maadoitusjännite muodostuu kaavasta $U_e = I_e * Z_e$, jossa I_e edustaa maasulkuvirtaa ja Z_e maadoitusimpedanssia. Maasta erotetuissa verkoissa maasulkuvirta on suoraan verkon aiheuttama kapasitiivinen maasulkuvirta. Muissa verkkomalleissa maasulkuvirta lasketaan verkon nollavirrasta $3I_0$, jolloin $I_e = r * 3I_0$, jossa r = reduktiokerroin. (Elovaara & Haarla 2011, 442.)

Ukkosjohtimisella johdolla kaikki maasulkuvirta ei palaa maata pitkin, vaan osa kulkeutuu maan asemasta ukkosjohtimissa, joka vähentää potentiaalia vikapylväällä, mutta nostaa potentiaalia sitten sähköasemalla minne vikavirta palaa. Reduktiokerroin kuvastaa maan kautta kulkevan virran suhdetta kokonismaasulkuvirtaan. Mitä pienempi reduktiokerroin, sitä suurempi osa maasulkuvirrasta palaa ukkosjohtimissa. (Imatran Voima 1973, VII 9.)

Reduktiokertoimet vaihtelevat johdon materiaalin mukaan. 110 kV voimajohdon reduktiokertoimet ovat luokkaa 0,9-0,95 ukkosjohtimien ollessa terästä. Teräsalumiinilla saavutetaan reduktiokerroin 0,3-0,55. Voimalinjoissa voidaan käyttää myös

kolmatta reduktiojohdinta, jos maaperän johtavuus on huono ja maapotentiaalit korkeita. Kolmas reduktiojohdin alentaa kerrointa 20%. (Elovaara & Haarla 2011, 442.)

Maapotentiaalien laskentaa sekä impedanssiketjua varten tietokoneohjelmalla laskettiin ukkosjohtimista muodostuva reduktiokerroin r sekä ukkosjohtimien impedanssi z_s . Laskentaa ei tässä työssä käsitellä syvemmin. Voimalinjan ukkosköyysinä käytettiin teräsalumiinia + OPGW johdinta: 106-AL2/25-ST1A "Sustrong" + OPGW "Sustrong", jolloin päästiin hyvään kertoimeen $r = 0,39 \angle -18,2^\circ$.

Laskentaa varten tarvittiin:

- pylväsluettelosta tarkat pylväiden mallit ja korkeudet
- ukkosjohtimien tyyppi, lukumäärä, halkaisija ja tasavirtaresistanssi

Ukkosjohtimille laskettiin myös impedanssiarvo, jota käytetään seuraavassa kappaleessa selvitetystä impedanssiketjussa. Laskennassa ukkosjohtimen impedanssin arvo oli: $Z_s = 0,71 \Omega/\text{km} \angle 73^\circ$.

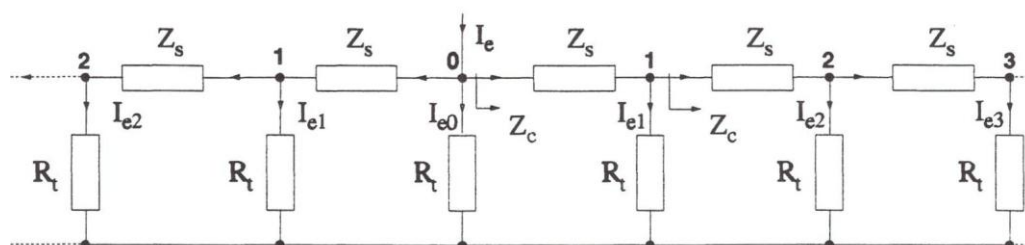
8.4 Impedanssiketju - pylväspotentiaalien laskenta

Maasulussa maahan tunkeutuva virta kohtaa maadoitusimpedanssin eli vastuksen. Impedanssin suuruus määräytyy maadoituselektrodin rakenteen, sen laajuuden ja maaperän johtavuuden mukaan. Ukkosjohtimet ovat olennainen osa maadoitusjärjestelmää suurjännitejohdoilla, sillä ne pienentävät maadoitusimpedanssia oleellisesti kytkemällä lähellä vikapaikkaa olevat pylväät rinnan vikapaikan pylväismaadoitusten kanssa. Näin ollen pylväiden ukkosjohtimet ja pylväismaadoitukset muodostavat kokonaisuudessaan impedanssiketjun. (VHV ohje 05, 5.)

Impedanssiketjun edustama maadoitusimpedanssi määrää pylväälle kohdistuvan potentiaalilin. Ketjun hyötynä maasulkuvirtaa voidaan suunnata ja jakaa useammalle pylväälle ukkosjohtimia pitkin, jolloin vikapylväällä vaikuttavaa maapotentiaalia saadaan pienennettyä, kun maasulkuvirta tunkeutuu maahan useaa eri reittien kautta. (VHV ohje 05, 5.) Näin ollen ei haittaa, vaikka mittauksissa jokin pylväs sijaitsee huonosti johtavassa maaperässä tai peräti avokalliolla. Tilannetta voidaan parannella

"ylimaadoittamalla" viereisiä pylväspaikkoja. Voimalinjan mittauksissa tämä tuli useasti esiin juuri avokallion kohdalla. Maaperä oli huonosti johtavaa, ja asutuksen lähellä maapotentiaalit nousivat yli raja-arvojen. Tällöin viereisille pylväille paranneltiin maadoitusrakenteita, ja potentiaalia saatiin laskettua. Kokemuseräisen tiedon mukaan maadoitusten parantaminen hyödyttää vain 5 pylvästä molempiin suuntiin vikapaikasta. Kuvassa 13 on esitetty impedanssiketju, jossa näkyy ukkosjohtimien jännävalikohtaiset impedanssit Z_s sekä pylväsrakenteiden maadoitusten muodostamat maadoitusvastukset R_t sekä maasulkuvirtojen $I_{e(n)}$ jakaantuminen. Luonnollisesti R_t ei ole vakio, vaan sen suuruus vaihtelee pylväittäin.

Kuva 13: Impedanssiketju



Impedanssiketjun laskentaa varten käytettiin valmista Sähköastekin tietokoneohjelmaa. Ohjelma laskee ketjun jokaisen haaran maadoitusimpedanssin ja virranjaon automaattisesti. Se ottaa huomioon ukkosjohtimien maapaluupiirin impedanssin Z_s jännettä kohti sekä pylvään resistanssin R_t ja suorittaa laskennan kompleksiluvuilla. Laskenta antaa tulokseksi maapiirin ekvivalenttisen impedanssiarvon jokaiselle pylväspaikalle. Ohjelmalla saadaan laskettua pylväspaikoilla vaikuttavat maapotentiaalit, kun pylväälle redusoitu maasulkuvirta on tiedossa. Kaikki muutokset maadoitusrakenteissa aiheuttavat nopeasti uudelleenlaskennan. Laskentaa voidaan tehdä joko käyttämällä ekvivalenttista maasulkuvirtaa ja kokonaislaukaisuaikaa tai käyttämällä todellisia maasulkuvirtoja ja laukaisuaikoja.

8.5 Maapotentiaalien leviäminen ja arviointi

Maapotentiaaliselvitystä varten lasketaan ja arvioidaan pylväspotentiaalien leviäminen vikatilanteessa. Näiden etäisyyksiin perustuvien potentiaaliarvojen avulla voidaan selvityksissä antaa viitteitä potentiaalien suuruuksista esimerkiksi henkilötur-

vallisuuden, maadoitusten ja viestintäverkon johtojen kannalta. Toisaalta suurjännitepylväillä tapahtuvan maasulun aikainen maadoitusjännite voidaan määrittää tyydyttävästi, mutta maapotentiaalin leviämisen laskennallinen tarkastelu on jo suhteellisen epätarkkaa. (VHV ohje -02, 12.)

Potentiaali leviää eri tavoin riippuen maaperän homogeenisuudesta. Mittauksissa on havaittu, että maapotentiaalin leviämistä ei voi laskea ainoastaan pylväspaikoilla tehtyjen maaperän ominaisvastusmittausten perusteella. Myös maaperän pinta- ja pohjakerrosten laatu vaikuttaa leviämiseen. Pintakerroksen ollessa pohjakerrosta paljon paremmin johtavaa, maapotentiaali pääsee leviämään laajalle alueelle verrattuna homogeeniseen maahan. Pohjakerroksen johtaessa hyvin maapotentiaalin leviäminen on vähäisempää. (Elovaara & Haarla 2011, 441.)

Maapotentiaalin leviämistä on tutkittu Suomen 110 kV verkossa ja mittausten perusteella on päädytty seuraavaan kaavaan, joka pätee 90% tapauksista:

$$V_{90}(x) \leq 0,11 * U_e * \ln\left(\frac{13300}{x}\right),$$

missä x on paikan etäisyys metreinä pylväältä ($20 \text{ m} \leq x \leq 200 \text{ m}$), ja U_e on pylvään maadoitusjännite. (Elovaara & Haarla 2011, 441.)

Laskennassa tietokoneohjelma määrittää jokaiselle pylväspaikalle potentiaalin leviämisen etäisyyden funktiona. Maapotentiaalien suuruudet lasketaan siis 20 m ja 100 m etäisyydellä jokaisesta pylvästä. Myöhemmissä tarkasteluissa potentiaalin suuruutta arvioitiin 20 ja 100 m etäisyyksien välissä suoraa skaalaamalla laskennan antamia potentiaaleja.

8.6 Sähköasemien maadoitusimpedanssien sovittelu

Voimajohdolle liittyvät sähköasemat täytyi ottaa huomioon maapotentiaalien laskennassa. Sähköyhtiöiltä pyydettiin asemien maadoitusimpedanssimittausten raportit. Asemien maadoitusimpedanssiarvot sisältävät sekä asemamaadoituksen että siihen liittyvien ukkosjohtimien yhteisen impedanssiarvon.

Laskennassa asemat sovitettiin ekvivalenttiseen impedanssiketjuun siten, että aseman "oletettu" oma impedanssi lisättiin johdon kanssa rinnan kytkentänä laskelmiin. Aseman "oletettua" impedanssia kasvatettiin niin kauan, että liittymäpylvään ekvivalenttinen maadoitusimpedanssi oli suuruudeltaan yhtä suuri mittaustuloksen kanssa.

8.7 Johdon maapotentiaaliprofiili

Laskelmien kautta saadaan piirrettyä maapotentiaaliprofiili voimalinjalle. Se on visuaalinen kuvaus tarkasteltavasta ja suunnittelun alaisesta johdosta. Pylväällä vaikuttavat maapotentiaalit on piirretty yhteen kuvaan maapotentiaalikäyränä, ja nämä on sidottu pylväspaikkoihin.

Samaan profiilikuvaan on sisällytetty omat maapotentiaalikäyrät:

- maapotentiaalille 20 m päässä pylväältä
- maapotentiaalille 100 m päässä pylväältä
- SFS EN50341-1/A1 maadoitusjännitteelle annetut UD raja-arvot (vain merkitykselliset pylväspaikat piirretään)
- Viestintäviraston määräyksen 43F/2015M §14 määrittämät raja-arvot
- pylväspaikan maaperän resistiivisyys

Liitteessä 4 on maapotentiaaliselvitykseen liitettävästä maapotentiaaliprofiilista sekä liitteessä 5 yhteenvetoa maapotentiaalilaskennasta.

Maapotentiaaliprofiilikuva on kokonaiskuva voimajohdon pylväillä vaikuttavista maapotentiaaleista, ja se liitetään myöhemmin viralliseen maapotentiaaliselvitykseen liitetiedostona.

9 MAAPOTENTIALISELVITYS

9.1 Selvityksen taustaa

Työn tuloksena kirjoitettu maapotentiaaliselvitys oli salassapidettävää aineistoa, joten sitä ei voitu suoranaisesti linkittää työhön. Tässä osuudessa valotetaan kuitenkin asioita, joita induktiovaarajänniteselvittelyssä käsitellään ja pohditaan.

Maapotentiaaliselvitys kuuluu osana voimajohtohankkeen yleissuunnitteluun. Selvityksessä käydään läpi suunniteltava voimajohto-osa, jota tarkastellaan läpikotaisin niin henkilöturvallisuuden kuin ympäristön kannalta. Käytännön tarkasteluissa pahimpana vikatilanteena pidetään yksivaiheista maasulkua 110 kV virtapiirissä, joka aiheuttaa maapotentiaalिन nousun vikapaikan ympäristöön. Maapotentiaali on vaarallinen elementti vikapaikassa. Se saattaa aiheuttaa vaaraa ihmisille ja eläimille kosketus- ja askeljännitteiden kautta. Samalla maapotentiaali kytkeytyy kaikkeen maaperässä olevaan johtavaan materiaaliin, viestintäverkon johtimiin, pienjänniteverkon maadoituksiin siirtyvänä tai takaperoisena jännitteenä aiheuttaen vaurioita rakenteille ja laitteille. (VHV ohje -02, 4.)

Maapotentiaaliselvitystä varten tarkastellaan ensisijaisesti voimajohdon maapotentiaalit henkilöturvallisuuden näkökulmasta, jolloin ihmisten arvioitu liikkuminen ja oleskelu johto-osuudella ovat tärkeä arviointia vaativa työ. Seuraavaksi arvioidaan viestintäviraston määräysten täyttyminen sekä maapotentiaalien siirtyminen viestintäverkon ilmajohtoihin, maakaapeleihin ja niiden maadoituksiin, mikä myös vaikuttaa henkilöturvallisuuteen. Riippuen suunniteltavasta voimajohto-osasta saattaa tulla tarve tarkastella runkojohtoon liittyvien sähköasemien vaarajännitteet, maapotentiaalien siirtyminen rautatiehen tai maakaasuputkistoon. Runkojohtoon liittyvät muut 110 kV linjat otetaan myös huomioon liittyvinä haarajohtoina.

Maapotentiaaliselvityksen tekoa varten tarvitaan:

- voimajohto-osan pylväsluettelo
- voimajohto-osan johtoaluekartat
- alustavat pylväspaikkakohtaiset maadoitussuunnitelmat

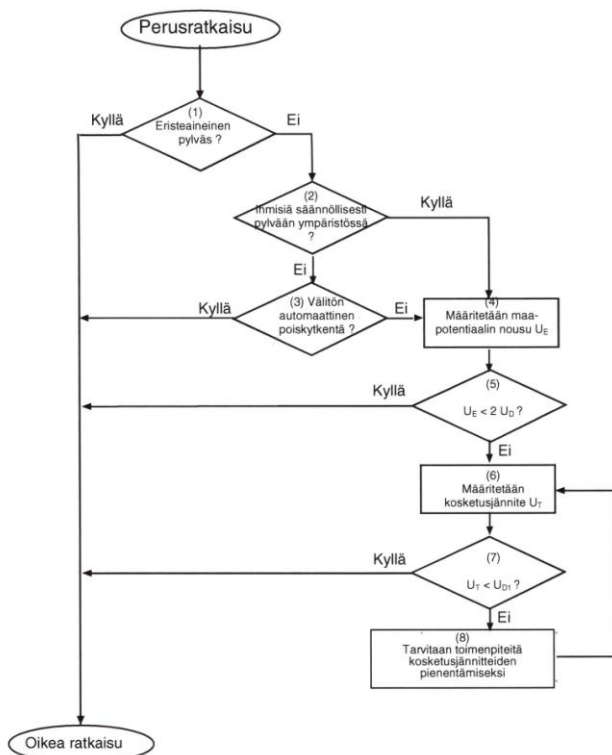
- maaperän resistiivisyyden arvot

On huomattava, että maapotentiaaliselvitys tapahtuu maadoitussuunnittelun kanssa lähes yhtä aikaa. Edellä kuvattua maadoitussuunnitelmaa tarkennetaan maapotentiaaliselvityksen aikana.

9.2 Kosketusjännitteiden huomiointi henkilöturvallisuuden kannalta

Standardi SFS-EN 50341-1/A1 esittää vuokaavion maadoitusten suunnitteluun ja kosketusjännitteiden tarkasteluun. Alla kuvassa 14 esitetyn vuokaavion avulla voidaan helposti edetä tarkastelussa pylväs pylväältä. Oikea ratkaisu kaavion lopussa tarkoittaa, että kosketusjännitteet ovat sallituissa arvoissa ja riittävän pieniä henkilöturvallisuuden takaamiseksi.

Kuva 14: Vuokaavio kosketusjännitteiden arviointiin. (SFS käsikirja 601, 214)



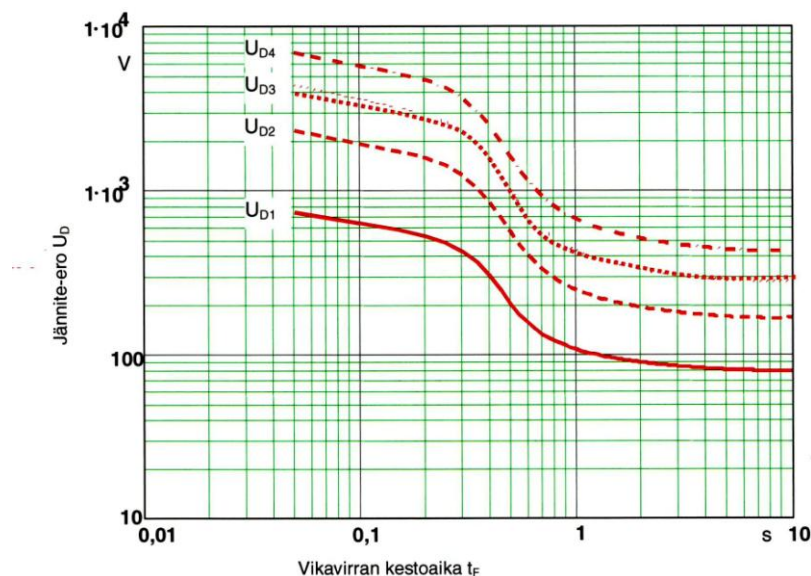
Standardissa on selvitetty tarkasti lohkokaaavion alanumerot 1-8, joten työn rajauksen vuoksi näitä ei tässä avata tarkasti. (1) Suunniteltavan johto-osan kaikki pylväät olivat teräspylväitä, jolloin jokaiselle pylväälle tuli tarkastella ihmisten liikkuminen

alueella. Kohta (2) tarkoittaa pylväiden sijaintipaikkoja, joihin ihmiset pääsevät ja voivat oleskella suhteellisen pitkiä aikoja (muutamia tunteja päivässä) tai lyhyitä aikoja (monta kertaa päivässä). Näitä pylväspaikkoja tarkastellaan yksityiskohtaisemmin maapotentiaaliselvityksessä. Kohta (3) tarkoittaa pylväiden sijaintipaikkoja, joihin ihmiset eivät voi vapaasti päästä tai joilla ihmisiä liikkuu harvoin. Näissä kosketusjännitteitä ei tarvitse huomioida, sillä distanssireleet johtojen päissä suorittavat automaattisen poiskytkennän. (4) Ihmisten oletettu oleskelu johtaa aina maapotentiaalın ja kosketusjännitteiden määrittämiseen. Pylväspaikoille on edellä redusoitu maadoitusjännitteet, nyt niitä verrataan kosketusjänniterajoihin (esitetään seuraavassa luvussa). (5) Pylvään maadoitusjännitteiden pitää olla pienempi kuin $2 \times U_D$ raja-arvo. Jos raja-arvot ylittyvät, määritellään kosketusjännite tarkemmin, ja tarvittaessa tehdään toimenpiteitä kosketusjännitteiden alentamiseksi. Kappaleessa käsitellyt U_D arvot ovat sama asia kuin kappaleessa 3 käsitelty kosketusjännite U_T . Eri kirjoissa asia mainitaan eri tunnuksilla.

9.3 Kosketusjännitteille määrättyt raja-arvot

Ihmiskehon läpi kulkeva sähkövirta on vaarallinen, ja sen vaikutuksille on standardeissa annettu ohjeita riippuen virran suuruudesta ja vian kestoajasta. Selvääkin selvempää on, että mitä isommista virroista ja jännitteistä on kysymys, sitä nopeammin pitää vika kytkeä pois. 110 kV verkossa distanssireleet havahtuvat maasulkuun ja kytkevät viat irti automaattisesti yleensä 0,2 - 0,5 sekunnissa. Suhteellisen nopeasta toiminnasta huolimatta maapotentiaali ehtii nousta aiheuttaen vaaratilanteen. Standardi SFS-EN 50341-1/A1 ja sekä kansallisessa liitteessä SFS-EN 50341-3-7 sen kohdassa 6. *Maadoitukset* ja 6.2.4.1 *Kosketusjännitteiden rajat eri sijaintipaikoissa* – kohdassa on esitetty kosketusjänniterajat ihmiskehelle. Ne on kohdistettuna standardissa annettuihin pylväspaikan sijaintiesimerkkeihin 1, 2, 3 ja 4 ja sen mukaan määritettyihin rajoihin U_{D1} , U_{D2} , U_{D3} ja U_{D4} . Kuvan 15 U_D rajat määrittelevät jännite-eron suuruuden vika-ajan funktiona erilaisissa sijaintipaikoissa. Näin esimerkiksi U_{D1} arvo saa olla 528 V, jos vika laukaistaan pois 0,2 sekunnin aikana.

Kuva 15: Kosketusjänniterajat vian kestoajan suhteen. (SFS käsikirja 601, 216)



Kuvan 15 U_D -käyrille annetaan seuraavanlaiset tarkat kuvaukset:

Käyrä U_{D1} : Pylväs sijaitsee paikalla, jossa ihmiset voivat oleskella paljain jaloin, kuten leikkikentät, uima-altaat, leirintäalueet, virkistysalueet ja niiden kaltaiset alueet. Lisäresistansseja ei oteta huomioon.

Käyrä U_{D2} : Pylväs sijaitsee paikalla, joilla ihmisten voidaan kohtuudella otaksua käyttävän kenkiä. Näitä ovat yleisten teiden jalkakäytävät, pysäköintialueet jne. Lisäresistanssina huomioidaan 1750Ω .

Käyrä U_{D3} : Pylväs sijaitsee paikalla, joilla ihmisten voidaan kohtuudella otaksua käyttävän kenkiä ja maan johtavuus on korkea, esim. $2000\Omega\text{m}$. Lisäresistanssina huomioidaan 4000Ω .

Käyrä U_{D4} : Pylväs sijaitsee paikalla, joilla ihmisten voidaan kohtuudella otaksua käyttävän kenkiä ja maan johtavuus on hyvin korkea, esim. $4000\Omega\text{m}$. Lisäresistanssina huomioidaan 7000Ω . (SFS käsikirja 601, 216-217.)

Standardissa sallitaan maadoitusjännitteelle kaksinkertainen arvo ($U_e = 2 \cdot U_D$) ja arvot on laskettu taulukossa 4 kahdelle yleiselle laukaisuajalle.

Taulukko 4. Maadoitusjännitteelle lasketut $2*U_D$ raja-arvot eri sijaintipaikoissa SFS-EN 50341-1/A1 kuvan 6.2 mukaan (SFS käsikirja 601, 216)

	Maadoitusjänniteraja U_e [V], kun $t_{kok} = 0,2$ s.	Maadoitusjänniteraja U_e [V], kun $t_{kok} = 0,5$ s.	Huomioitava lisä- resistanssit R_a [Ω]
$2*U_{D1}$	1056	408	0
$2*U_{D2}$	3156	1108	1750
$2*U_{D3}$	5856	2008	4000
$2*U_{D4}$	9456	3208	7000

Tarkasteltaessa maapotentiaaleja henkilöturvallisuuden kannalta suunnittelija määritteli jokaiselle voimajohto-osan pylväspaikalle sen sijainnin mukaisen $2*U_D$ raja-arvon. Selvin tapa oli lähestyä asiaa johtoalueen karttaa tutkimalla ja löytää kriittiset U_{D1} sijaintipaikat. Tarkastelussa 38 pylvästä päättyi yksityiskohtaiseen tarkasteluun asutuksen tai ihmisten liikkeiden vuoksi. Näistä vain 6 pylväspaikkaa pidettiin selvästi U_{D1} raja-arvon alueena. Muissa paikoissa ihmisten oletettiin kohtuudella olevan kengät jalassa ja näin kuuluvan $U_{D2/3/4}$ raja-arvon piiriin, riippuen maan johtavuudesta. U_D raja-arvojen määrittelyjen jälkeen tarkasteltiin pylväille laskettuja maadoitusjännitteitä taulukon 4, sarakkeen 2 arvoihin, sillä laskennassa maadoitusjännitteet oli laskettu ekvivalenttisella vikavirralla ja 0,5 s kokonaislaukaisuajalla.

U_D raja-arvojen määrittelyssä on hyvä käyttää tervettä maalaisjärkeä. Esimerkiksi todennäköisyys, että keskellä korpea pylväällä tapahtuisi maasulku (esim. salaman aiheuttamasta takaiskusta) ja juuri sen 0,2 s kestoajan aikana henkilö olisi avoin jaloilla keskellä korpea, lähentelee harvinaisuutta. Standardi myös sanoo, että sijaintipaikat, joissa ihmisiä oleskelee satunnaisesti, kuten metsät ja avoimet paikat maaseudulla, eivät kuulu U_{D1} raja-arvojen piiriin. Näin ollen kaikki metsäalueet, pellot, suot ja korvet kuuluvat U_{D2} , U_{D3} tai U_{D4} luokkiin riippuen maaperän resistiivisyydestä.

9.4 Ympäristöön siirtyvät jännitteet

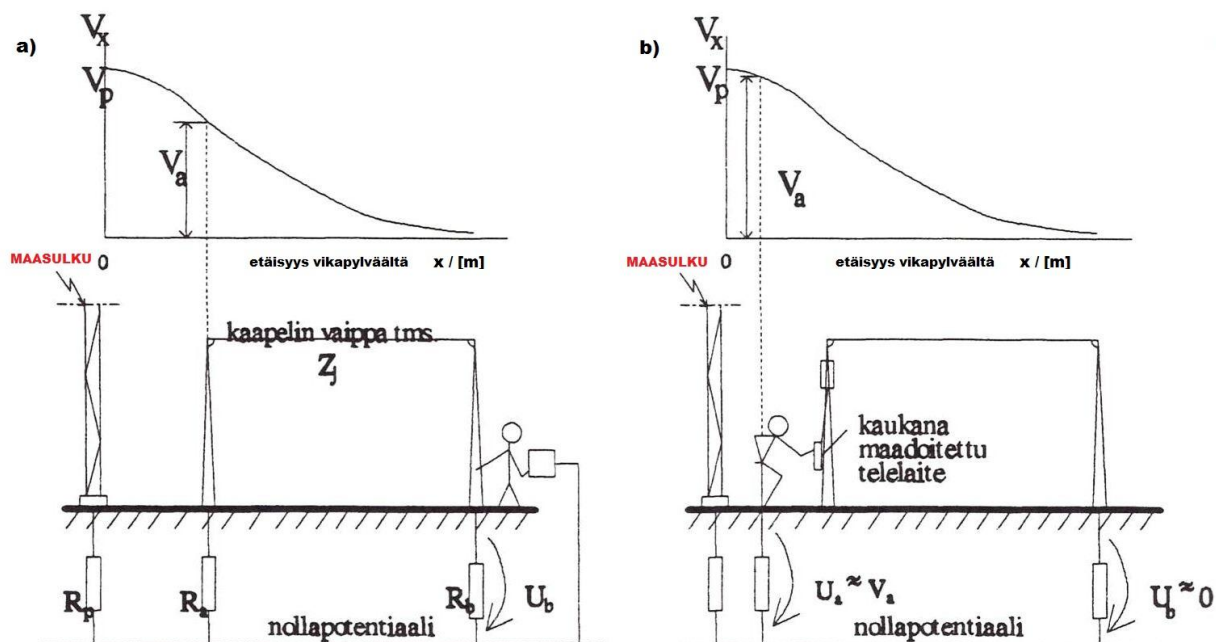
Kaikki metalliset johtavat osat suurjännitejohdon alla tai läheisyydessä levittävät maasulun aikaisia potentiaaleja, ja maapotentiaaliselvityksessä nämä ovat syytä tarkastella mahdollisimman hyvin. Kyseessä voivat olla metalliset vesijohtoputket, ai-

dat, pienjännitekaapelit, maadoituselektrodit tai mikä tahansa elementti, jossa sähkö kulkee.

"Siirtyneet potentiaalit on tarkistettava, jos pylväk tai sen maadoituselektrodit ovat alle 100m päässä pienjännitejohdon maadoituselektrodista tai muusta PEN-johtimeen ja maahan yhdistetystä metalliosasta. Tarkistaminen voidaan tehdä laskelmin tai mitaamalla. Siirtyneet potentiaalit eivät saa ylittää arvoa $\frac{1000}{\sqrt{t/s}} V$, missä t on pisin jatkuvan maasulun kesto aika." (SFS-EN 50341-3-7 FI.2).

Kuvassa 16 kuvataan a) kohdassa kuinka maasulun aikainen jännite siirtyy telejohdon mukana asentajalle saakka, joka on toisella kädellä kiinni neutraalissa maassa olevassa telelaitteessa. Sähköiskun vaara. B) kohdassa kaukana maadoitettu telelaite tuo neutraalin maan vikapaikan läheisyyteen, jolloin asentaja on jälleen sähköiskuvaarassa.

Kuva 16: a) televerkon kautta siirtyvä jännite, b) takaperoinen jännite (VHV-ohje 05)



Siirtyville potentiaaleille laskettiin 0,5 s laukaisuaikaa vastaava rajajännite, ja se oli 2121 V. Pylväspaikoille laskettu maadoitusjännite alitti jokaisella pylväspaikalla sallitun siirtyvän jännitteen arvon pienjännite ja viestintäverkon maadoituksiin.

9.5 Viestintäviraston määräys sähköisestä suojaamisesta

Viestintävirasto on laatinut määräyksen 43F/2015M *Määräys viestintäverkon sähköisestä suojaamisesta*. Määräyksessä otetaan kantaa suojaustoimenpiteistä, joilla viestintäverkko saadaan sietämään ja kestämaan sekä ilmastollisia ylijännitteitä että muiden verkkojen aiheuttamia ylijännitteitä, kuten esimerkiksi 110 kV suurjännite voimajohtojen maasulun aikaisia potentiaaleja. (Viestintävirasto 2015, 1.)

Tässä työssä tarkastelulla johto-osuudella viestintäviraston määräyksen 43F/2015M raja-arvot 650V ylittyivät 130 pylväspaikalla, 20m etäisyydellä pylvästä 82:lla pylväspaikalla ja 100m päässä vielä 46 pylväspaikalla. Tämä ei ollut yllättävä tieto, sillä voimajohto-osuus kulki vaikeissa maadoitusolosuhteissa, ja tästä johtuen maapotentiaalit olivat korkeita. Johtoalueen karttaa tutkittiin tarkkaan ja havainnoitiin kaikki viestintäverkon johdot ja laitteistot. Tällaisia johtoja ja laitteistoja havaittiin 7 kpl sijaitsevan 100m lähempänä voimajohtoa. Verratessa näiden pylväspaikkojen maapotentiaaleja viestintäviraston 14§ raja-arvoon 2021 V ylityksiä ei kuitenkaan tapahtunut, eli siirtyvien jännitteiden osalta oltiin hyvinkin raja-arvojen sisällä. Kuitenkin pylväspaikkojen läheisyydessä olevien kiinteistöjen maadoituselektrodin olemassaolo on varmistettava ja tarvittaessa lisättävä.

9.6 Sähköasemien vaarajänniteselvitys

Voimalinjalle liittyvät sähkö- ja erotinasemat samoin kuin Liikenneviraston omistamat rautatien syöttöasemat otetaan huomioon maapotentiaaliselvityksessä. Sähkö- ja erotinasemien maadoitukset liitetään osana pylväasmaadoituksiin (yleensä $\text{Cu}70 \text{ mm}^2$) maadoitussuunnitelman mukaan. Asemien kosketusjännitevaatimukset pitää tarkastella mahdollisen maasulun varalle, jotta asemalla työskentelevien henkilöiden turvallisuus on varmistettu. Tarkastelussa käytetään hyödyksi voimajohtojen pylväille laskettuja maadoitusjännitteitä, sillä niitä voidaan pitää asemalla käytännössä vaikuttavana jännitteenä vian aikana. Tämä koskee vain sellaisia sähköasemia, jotka ovat liittyneinä tarkasteltavaan voimajohtoon ja niille ei tule syöttöjä muualta kuin tarkastellulta voimajohtolta.

Standardi SFS 6001 + A1 + A2 antaa sallitut jännitearvot ja tarvittavat menetelmät, joiden avulla kosketusjännitevaatimuksia voidaan noudattaa. Tarkastelussa käytetyt maasulun kestoajat määräytyvät asemien sijainnin perusteella johto-osuudella. Maasulun kestoajoihin viitaten asemalla vaikuttava kosketusjännite U_T saa olla korkeintaan 500 V (0,2s) tai 210V (0,5s). (SFS 6001, kuva 9.1) U_T nimitys on sama kuin SFS-EN 50341-1 käyttämä U_D .

(SFS 6001 + A1 + A2, 87) mukaan kosketusjännitteet katsotaan olevan riittävän pienet, jos aseman maadoitetuissa osissa vaikuttava maadoitusjännite U_e on korkeintaan:

$$2 \times U_T = 2 \times 500 \text{ V} = 1000 \text{ V (kesto aika 0,2s)}$$

$$2 \times U_T = 2 \times 210 \text{ V} = 420 \text{ V (kesto aika 0,5s)}$$

tai sähköaseman täytettäessä standardin erityistoimenpiteet M, arvot voivat olla:

$$4 \times U_T = 4 \times 500 \text{ V} = 2000 \text{ V (kesto aika 0,2s)}$$

$$4 \times U_T = 4 \times 210 \text{ V} = 840 \text{ V (kesto aika 0,5s)}$$

Sähköasemien kosketusjännitteet laskettiin käyttämällä omaa ohjelmaa. Liitteessä 6 on esimerkkikuva eräälle asemalle tehdystä laskelmasta. Laskennassa käytettiin johto-osuuden todellisia vikavirtoja sekä laukaisuaikoja. Osalla sähköasemista $2 \times U_T$ arvot ylittyivät, jolloin maapotentiaaliselvitykseen kirjattiin ohjeita SFS standardiin 6001 vedoten, miten kosketusjännitteet saadaan täyttymään. Käytännössä asemilla täytyisi parantaa maadoitusimpedansseja tai pienentää maasulkuvirran vika-aikaa, jos halutaan täyttää $2 \times U_T$ jänniterajat. Ohjeet ovat hankalat toteuttaa. Maadoituksia on vaikea parantaa johto-alueella, jossa maaperän johtavuus oli mittaustulosten keskiarvona 9500 Ω m. Samoin kyseiset asemat sisältyivät jo lähtökohtaisesti 0,2s laukaisuajan omaavalle johto-osuudelle, joten vian kestoajakaikin on vaikea pienentää.

Lähinnä kyseeseen tulee $4 \times U_T$ arvon käyttö. Tällöin asemalla tulee varmistua, että sen rakenteet täyttävät standardiin määrätyt erityistoimenpiteet M. Erityistoimenpiteissä on kuvattu käyttöpaikan eristystä, potentiaaliohjauksia sekä kaikkien metalliosien yhdistämistä, jotta koko asemalla olisi sama potentiaali, eikä vaarallisia potentiaalieroja ei synny. (SFS 6001 + A1 + A2, 98-99) Maadoitusjännitteiden ylittäes-

sä raja-arvot, asemalta lähtevien viestintäverkon kaapelit ja kuitujen vaipat tulee suojata siten, että vikatilanteen aikana sähköaseman potentiaalit eivät pääse siirtymään viestintäverkkoon. Käytettäessä radioyhteyttä tai metallitonta valokaapelia viestiyhteydessä, vaarajännite ei siirry. Suojauksessa käytetään ylijännitesuojia, venttiilisuojia, galvaanista erotusta ja riittäviä kaapeleiden jännitekestoisuuksia. Myös aseman ympäristön viestintäverkon rakentamista on valvottava. (VHV ohje 05, 23.) Nämä kaikki kirjataan maapotentiaaliselvitykseen tarvittavina toimenpiteinä vaarajännitteiden ylittäessä raja-arvot (Liite 6).

9.7 Rautatie voimajohdon läheisyydessä

Jos suunniteltavan voimalinjan läheisyydessä kulkee rautatie, se on otettava huomioon tarkasteluissa. On mahdollista, että maasulun aikana rautatiehen siirtyy potentiaaleja tai kosketusjännitteitä. Standardissa EN 50122-1 + A1, sen kohdassa 9.2.2.2 *Effective touch voltage limits* ja Liikenneviraston ohjeessa 21/2013 RATO 5 *Sähköisitetty rata*, kohdassa 5.9.2.2 *Kiskopotentialista aiheutuva kosketusjännite* on esitetty suurimmat raja-arvot vikajännitteelle maasulun kestoajan mukaan. Vikajännitteet saavat olla 645 V, kun maasulun $t_{\text{kok}} = 0,2$ s ja 220 V, kun $t_{\text{kok}} = 0,5$ s. (Liikennevirasto 2013, 82.)

Kuva 17: Rautatie voimajohdon läheisyydessä vaatii aina selvitystä.
(Liikennevirasto 2013, etusivu)



Ratahallintokeskuksen yleisohjeessa sen liitteessä 4 *Ulkopuoliset maadoitukset sähköradan läheisyydessä* annetaan suojaetäisyyksiä sähköradan kohteista ulkopuolisiin johtoihin ja maadoituksiin. Maadoitusten tulee sijaita 20 m etäisyydellä sähköradan rakenteista ja niihin maadoitetuista osista ja 5 m Ratahallintokeskuksen kaapeleista. Pylväs ja asemamaadoitukset rinnastetaan näihin. (Ratahallinto 2004, liite 4). Ratojen suunnitteluohjeissa ja käytännöissä sähkörata siihen liittyvine rakenteineen pyritään siis pitämään erillään ulkopuolisista maadoituksista. Tällöin syöttöasemien maadoituselektrodit eristetään ja erotetaan rata-alueesta ja sen läheisyydestä. On kuitenkin mahdollista, että galvaaninen yhteys löytyy rakenteiden välillä ja päästää vaarajännitteen järjestelmään. Radan ja sen laitteiden oman potentiaalintasauksen johdosta potentiaalieroja ei kuitenkaan pääse syntymään, ja tämä takaa henkilöturvallisuuden.

Tarkastelulla voimajohto-osuudella kulki rautatie, ja sen vuoksi aihetta tarkasteltiin lähemmin. Dokumentaatiosta kävi ilmi, että rautatietä syöttävien sähköasemien maadoitukset on kytketty yhteen suurjännitelinjan maadoituksiin 70 mm^2 maadoituskupareilla. Vanhan voimalinjan sivustoilla maadoituskuparia on ketjutettu pylväiltä toisille, johon myös pylväät oli kytketty. Kyseisten sähköasemien kohdalla maasulusta aiheutuvat maapotentiaalit eivät ylittäneet siirtyville jännitteille annettua raja-arvoa 2121 V. Arvioitaessa RATO ohjeen osa 5 sallimia suurimpia kosketusjännitteitä käytettiin todellisia vikavirtoja ja 0,2 s laukaisuaikaa johtuen asemien sijainnista johdolla. Maapotentiaalit pylväillä ja viimeistään 20 m päässä pylväältä alittivat ohjeissa annetut raja-arvot, joten toimenpiteitä ei tarvittu rautatien suhteen. Uuden voimajohto-osuuden maadoitukset yhdistetään rautatien syöttöasemien maadoitusten kanssa myös uudella suunniteltavalla johto-osuudella.

9.8 Maakaasuputkisto voimajohdon läheisyydessä

Voimalinjan läheisyydessä kulkeva maakaasuputkisto on teräsrakenteinen putkisto, joka on otettava huomioon maapotentiaalintarkasteluissa. Maasulun aikana maakaasuputkiston paljaisiin metallisiin osiin voi siirtyä potentiaaleja tai kosketusjännitteitä, ja vaikutukset on otettava huomioon, jotta maakaasuputken käyttö on turvallista. Kosketeltavia putkiston osia ovat korroosiosuojauksen suoja-asemien ja mittauspis-

teiden, venttiili- ja kaavinasemien, paineen lisäys- ja vähennysasemien sekä ulospuhallusputkien maanpäälliset osat. (SFS 5717, 3.)

Standardissa SFS 5717 *Maakaasun siirtoputkiston sijoittaminen suurjännitejohdon tai kytkinlaitoksen läheisyyteen*, on esitetty raja-arvot kosketusjännitteen suuruudelle. Normaalin käytön aiheuttama kosketusjännite ei saa ylittää 25V putkiston paljaissa ja kosketeltavissa osissa. Ja 110 kV järjestelmän yksivaiheisen maasulun aiheuttama lyhytaikainen kosketusjännite ei saa ylittää $\frac{1000}{\sqrt{t/s}}$ V, jossa t = maasulun kesto aika sekunteina. (SFS 5717, 3). Laskennassa käytettiin ekvivalenttista vikavirtaa sekä 0,5 s laukaisuaikaa, jolloin kosketusjännite saa olla enintään 1414 V.

Kuva 18: Maakaasuputken merkintä maastossa. (kuvalähde Gasum Oy)

Kuva 19: Maakaasun runkoputken rakentamista. (kuvalähde Gasum Oy)



Maakaasuputken sijoittamisesta annetaan omia ohjeita, joihin työssä ei voitu vaikuttaa, koska maakaasuputket oli jo rakennettu ja käytössä. Tulevia pylvään paikkoja ja suunniteltuja maadoituksia voidaan kuitenkin arvioida maapotentiaalinn kannalta. Maadoitusjännitteen ollessa 1,5 kertaa aiemmin annettu $\frac{1000}{\sqrt{t/s}}$ V kosketusjännitteen raja, on 110 kV johdon pylväiden maadoituselektrodit oltava vähintään 20 m etäisyydellä maakaasuputkesta. 110 kV avojohdon ja maakaasuputken risteämä pitäisi tapahtua mahdollisimman kohtisuoraan, mutta vähintään 60° kulmassa keskijänteeseen nähden. Jos kosketusjännitteelle annettu raja (tässä 1414 V) ylittyy pylväällä, maadoituselektrodit on poistettava 20m lähempänä maakaasuputkea. (SFS 5717, 4).

Työn aikana tarkasteltiin kolmea eri kaasuputkea, joista osa leikkasi suurjännitejohdon kulkureitin kanssa, ja yksi kulki johtokadun vierellä. Risteämät tapahtuivat lähes kohtisuoraan keskijänteen kohdalta, ja niiden läheisyydessä pylväspotentiaalit olivat maltilliset, joten suunniteltuja pylväsmaadoituksia ei tarvinnut siirtää. Maakaasuputkistot eivät myöskään olleet 5m lähempänä mitään pylvään osaa. Vierellä kulkevan kaasuputken keskietäisyydeksi laskettiin 1500 m. Maakaasuputkea lähellä olevilla pylväillä ei 1414 V rajaa ylitetty. Toimenpiteiksi kirjattiin kuitenkin mahdollisen aktiivisen katodisen korroosiosuojauksen olemassaolon selvittäminen kaasuputken omistajalta, koska sen olemassa olo vaatii lisätarkastelua. Maasulkutapauksessa korroosion suojauksen anodikenttään siirtyvät jännitteet sekä minimietäisyydet on tutkittava tarkoin.

9.9 Raja-arvot ylittyvät

Maapotentiaalien tarkasteluissa törmättiin siihen, että mitatuista pylväistä useilla maadoitusjännitteet olivat liian suuria henkilöturvallisuuden kannalta. Syynä siihen oli ensinnäkin huono maaperä, jolloin maadoitusresistanssit ovat korkeita. Toiseksi oli pylväspaikkoja, joissa arvioitiin ihmisiä kulkevan paljain jaloin, jolloin täytyy käyttää pienintä U_{D1} raja-arvoa tarkasteluissa.

Suunnitelmissa voidaan parannella viereisten pylväiden maadoituksia "ylimaadoitamalla", jos niiden kohdalla on paremmin johtavaa maata. Vaikutus on kuitenkin molempiin suuntiin maksimissaan vain viisi pylvästä.

Toisena vaihtoehtona on lisätä reduktiovaikutusta, jolloin ensisijaisesti voidaan vaihtaa ukkosjohtimet vahvemmiksi. Jos sekään ei tuo helpotusta, voidaan suunnitella tietyille pylväsvälille kolmas reduktiojohdin. Sen vaikutus on jo niin suuri, että maan kautta kulkeva maasulkuvirta pienenee, ja maapotentiaali samassa. Kolmas reduktiojohdin on kallis ratkaisu, koska se tuo muutoksia pylväsrakenteisiin.

Raja-arvojen ylittyessä potentiaalinhjauselektrodeilla varmistetaan vikapylvään lähelle sama potentiaali, jolloin turvallisuus paranee. Silti askeljännitteet sekä siirtyvät jännitteet ovat yhä korkeita. Pylväiden lähelle voidaan laskea verkkomainen laajempi

maadoitus ja yrittää näin parantaa tilannetta. Yksi vaihtoehto on eristää pylväs kokonaan aidalla ja sorastamalla maaperä.

Maapotentiaaliselvityksen lopussa annetaan myös joukko suosituksia. Työn johtoauealla voimajohtoa halkoi 14 kappaletta avojohtoja, joista suurin osa oli 20 kV keski-jännitejohtoja. Voimalinjan uusimisen yhteydessä nämä suositellaan maakaapeloitavaksi.

10 INDUKTIOVAARAJÄNNITSELVITYS

10.1 Selvityksen taustaa

Työn tuloksena kirjoitettu induktiojänniteselvitys oli salassa pidettävää aineistoa, joten sitä ei voitu suoranaisesti linkittää työhön. Tässä osuudessa valotetaan kuitenkin asioita, joita induktiovaarajänniteselvittelyssä käsitellään ja pohditaan.

Induktiovaarajänniteselvitys kuuluu osana voimajohtohankkeen yleissuunnitteluun. Selvityksessä läpikäydään suunniteltava voimajohto-osa, jota arvioidaan tarkkaan viestintäverkkojen kannalta. Selvityksessä arvioidaan, aiheuttaako suurjännitteinen voimajohto ongelmia niin normaalikäytön kuin maasulun aikana voimajohdon läheisyydessä sijaitseville viestintäverkon johtimille tai laitteille. Ihminen voi joutua alttiiksi vaarajännitteelle keskuksella tai päätteellä tehtävissä töissä sekä laitteiden käyttötilanteessa. Laitteet taas ovat jatkuvasti alttiina vahingoille, jos ne ovat liian lähellä suurjännitejärjestelmän maadoituksia ilman riittävää eristystä. Selvityksessä täytyy myös huomioida kaikkia mahdollisia metallisia rakenteita, joihin sähkömotorinen voima (smv) saattaa indusoitua sähkömagneettisen induktion vuoksi. Jos laskennalliset arvot ylittävät määräyksissä annetut rajajännitteet, kyseisille viestintäverkon johdoille lasketaan tarkemmin indusoitunut smv. Selvityksen lopussa annetaan tarvittavat toimenpide-ehdotukset induktiojännitteen rajoittamiseksi, mutta voidaan antaa tarpeen vaatiessa myös joukko suosituksia.

Induktioselvityksen liitteiksi sisällytetään yleensä:

- voimajohtoa ympäröivien keskitinalueiden sijoittuminen voimajohtoon nähden
- voimajohtoja ympäröivien keskitinalueiden induktion rajapituuslaskelmat
- kartta johtoalueesta, joka sisältää lähimmät keskitinalueet

Käytännössä induktioselvityksen toteuttaminen etenee seuraavien toimien mukaisessa järjestyksessä:

1. Tiedon keruu ja kartta-aineiston tutkinta
2. Indusoivan maavirran määrittäminen
3. Rajajännitelaskelmien teko
4. Induktiojännitteiden tarkastelu normaalissa käyttötilanteessa
5. Induktiojännitteiden tarkastelu maasulun aikana
6. Selvitykseen kirjatut toimenpiteet sekä liitetiedostojen teko

Selvityksessä otetaan kantaa myös muihin kytkeytymistapoihin, tosin induktio on pääosassa.

10.2 Tiedon keruu ja kartta-aineiston tutkinta

Induktiovaarajänniteselvitystä varten suunnittelijat ovat yhteydessä alueella toimiviin operaattoreihin, jotka saa kohtuullisen hyvin selville esimerkiksi käyttämällä internetin Johtotieto-palvelua. Palvelusta voi etsiä kuntakohtaisesti alueella toimivat operaattorit.

Tiedon keruussa hankitaan vähintään seuraavat tiedot:

- viestintäverkon johtokartat 10 km voimajohto-osien kummaltakin puolelta
- keskitinalueiden sijainnit voimajohdon läheisyydessä
- keskittimien sijainnit keskitinalueilla
- keskittimien ja tilaajien väliset tilaajajohdot
- keskittimien väliset yhdyskaapelit
- johtotyypit, niiden parimäärät ja pituudet

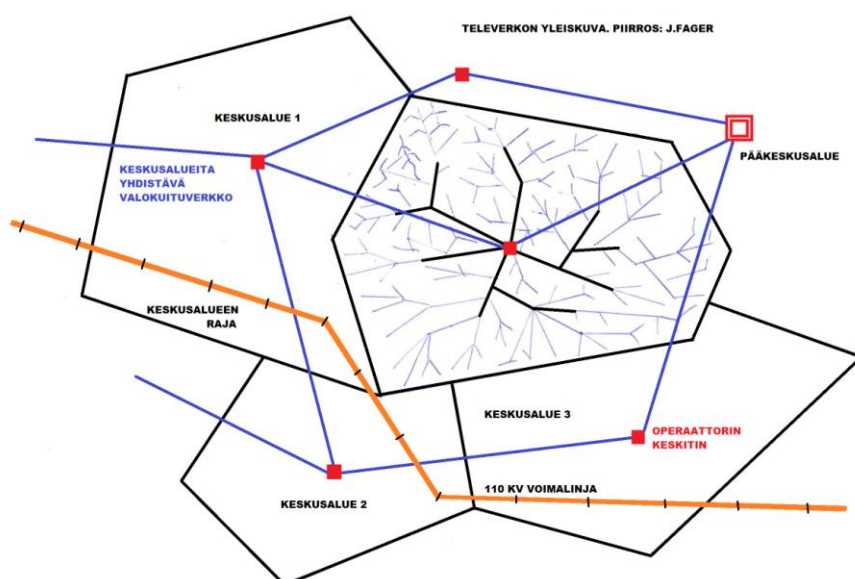
- energialaitosten sähköverkon kaapelointitiedot
- vesilaitosten vesijohto- ja viemäriputkikartat
- kaasuputken sijaintitiedot
- mahdolliset osuuskuntien rakentamat kyläkuitujen reittitiedot

Suurjännitteisen johdon maasulun aikana viestintäverkon johtoihin indusoituva jännite riippuu johtojen keskinäisestä sijainnista, viestintäjohtojen pituudesta, maasulkuvirran suuruudesta sekä virran syöttösuunnasta. Vaarallisen jännitteen syntyminen on mahdollista laajalle alueelle suurjännitejohdon molemmin puolin Suomen huonosta maaperästä johtuen. Normaalikäytön aikaisiin rajajännitetarkasteluihin käytetään VHV ohjeessa 2 mainittuja rajapituuskäyriä. Maasulun aikana indusoiduille jännitteille tarkastelut tehdään keskinäisimpedanssiin ja sallittuun rajajännitteeseen perustuvilla laskelmilla. (VHV ohje 02, 3.)

10.3 Televerkon rakenne

Induktioselvityksessä tarvitaan peruskäsitystä viestintäverkon rakenteesta. Yleiskuvana voidaan käyttää kuvaa 20. Vanhan puhelinverkon fyysinen rakenne koostuu keskitinalueista, keskittimistä, tilaajajohdoista ja keskitinalueita yhdistävästä kuituverkosta.

Kuva 20: Televerkon yleiskuva. Kuvaa halkoo voimajohto.



Keskittimet ovat televerkon laitteita ja solmukohtia. Keskittimien väliset yhteydet ovat suurelta osin nopeita valokuiturakenteisia yhteyksiä. Keskittimiltä lähtevät tilaajajohdot. Ensin isompina johtoina, joissa on useiden tilaajien johtoja tähtikytkennän muodossa. Lopussa johdinparien määrät pienenevät, ja kullekin tilaajalle tulee oma johdinparinsa.

Keskittimien välissä ei nykyisin enää ole kuparisia johtoja (varayhteyksiä lukuun ottamatta), mutta tilaajille menevissä johdoissa kuparinen maakaapeli tai ilmajohto on vielä melko yleinen varsinkin maaseudulla. Näihin kuparisiin johtoihin maasulun aikaiset induktiojännitteet pääsevät pureutumaan, ja niitä täytyy tarkastella. Pitää muistaa, että vain voimajohdon suuntaiset johdot ovat vaarassa. Kohtisuorassa voimalinjaan oleviin johtoihin ei indusoidu jännitettä.

10.4 Induktiovaarajännitteiden määräyksiä ja raja-arvoja

Viestintävirasto antaa määräyksessään 43F/2015M *Määräys viestintäjohtojen sähköisestä suojaamisesta* suurimmat sallitut raja-arvot induktiiviselle ja kapasitiiviselle kytkeytymiselle normaalikäytössä (13§) sekä maasulussa (14§).

(13§) :

"Viestintäverkon johtimiin indusoituva pitkäaikainen sähkömotorinen voima (smv) ei saa ylittää 60 V suurjännitelaitteiston ollessa normaalikäytössä tai sähköradan ajoittain aiheuttamana" (Viestintävirasto 2015, 5).

"Viestintäverkon johtimiin suurjännitelaitteistosta sen normaalikäytössä kapasitiivisesti kytkeytyvän jännitteen aiheuttama virta johtimia kosketeltaessa ei saa ylittää 10 mA. Kosketusvirraksi katsotaan johdinparin yhteen kytkettyjen johtimien ja maan välille kytketyn 3000 Ω resistanssin kautta kulkeva virta." (Viestintävirasto 2015, 5).

(14§) :

"Ilman suojausta olevan viestintäverkon johdon johtimiin indusoituva pitkittäinen sähkömotorinen voima ei saa ylittää 430 V suurjännitelaitteiston ollessa yksivaiheisessa maasulussa. Kuitenkin vähintään 110 kV suurjännitelaitteiston yksivaiheisessa maasulussa indusoitunut sähkömotorinen voima (smv) saa nousta korkeintaan suosituksen ITU-T K.68 kohdan 6.2.2 taulukon 18 mukaisiin arvoihin." (Viestintävirasto 2015, 5).

ITU-T K.68 taulukossa 18 annetut raja-arvot ovat:

1500 V, kun laukaisuaika $0,10 < t_{\text{kok}} \leq 0,2$ s

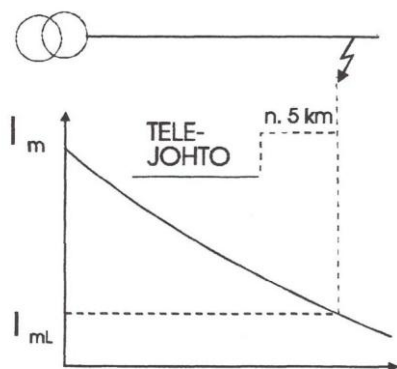
650 V, kun laukaisuaika $0,35 < t_{\text{kok}} \leq 0,50$ (ITU-T 04/2008, 20)

10.5 Indusoiva maavirta

Induktioselvittelyn peruslähtökohtana on selvittää, kuinka suuri jännite viestinjohdossa indusoituu. Sähkömagneettisen induktioilmiöön liittyvän sähkömotorisen voiman määrittämisessä tarvitaan kuitenkin tieto viestintäjohtojen vaikuttavasta maavirrasta maasulun aikana. Maavirran suuruus saadaan kuvan 12 epäsymmetriapiirroksista, jossa vikavirrat on kuvattu syöttösuuntien mukaan. Viestintäjohtoon vaikuttava maavirta ei ole sama asia kuin pylväillä vaikuttava maasulkuvirta I_e . Maasulun kohdalla vikavirta jakaantuu ukkosjohtimiin, ja lähimmillä jänneväleillä rinnan kytkeytyviin lähipylväiden maadoituksiin, jolloin maasulkupaikkaan laskettu maasulkuvirta ei kokonaisuudessaan indusoi jännitettä viestintäjohtoon. (VHV ohje 02, 10-11.)

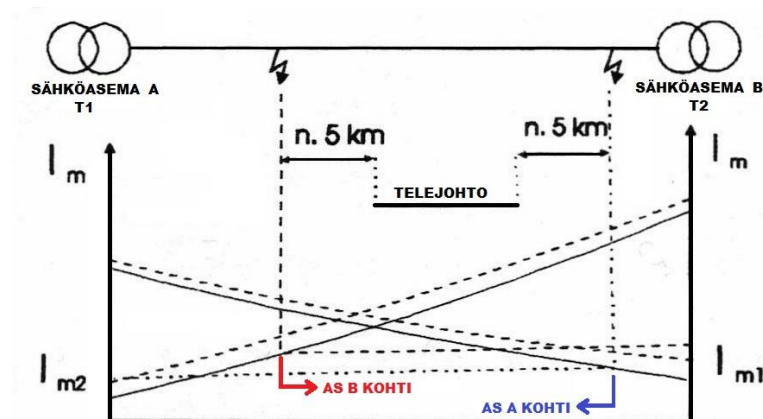
Yhdestä suunnasta syötetyllä johdolla indusoituvana maavirtana käytetään n. 5 km etäisyydellä viestintäjohtojen päästä esiintyvää virtaa. (Kuva 21). (VHV-ohje 02, 10)

Kuva 21: Voimajohto syötettynä yhdestä suunnasta - indusoivan maavirran määrittäminen. (VHV ohje 02, 10)



Opinnäytetyön tapauksessa johtoa voitiin syöttää molemmista päistä. Tällöin pitää tutkia, kummasta suunnasta syötetty virta on suurempi, ja indusoi suurimman jännitteen telejohtoon. Indusoivana maasulkuvirtana käytettiin kuvan 22 vastaavalla 5 km säännöllä saatua virtaa, joista valittiin suurempi. Esimerkkinä kuvassa 22 näkyy molempien sähköasemien muuntajat, viestintäjohtoon sijainti, virtakäyrät osoittaen yksivaiheisen maasulun aikaista maasulkuvirtaa eri syöttötilanteissa. Yhtenäisillä viivoilla kuvataan virtoja, kun molemmat asemat syöttävät. Katkoviivoilla kuvataan syöttövirtoja, kun toinen pää on auki.

Kuva 22: Voimajohto syötettynä molemmista suunnista - indusoivan maavirran määrittäminen. (VHV ohje 02, 10)



Induktion tarkastelussa ja maasulkuvirtoja valitessa täytyy mieltää maasulkupaikan ja viestintäjohtoon sijainti. Viestintäjohtoon indusoituu jännite vain, jos se sijaitsee vikavirtaa syöttävän sähköaseman ja maasulkupaikan välissä! Maasulkuvirran kulku-

reittihän on vikapylväältä maahan, josta se kulkeutuu syöttävälle asemalle, ja nousee maadoitetusta tähtipisteestä takaisin vaihejohtimeen.

Työn aikana lähtötiedoista kartoitettiin kaikki voimajohdon läheisyydessä olevat keskusalueet, joita oli yhteensä 38 kappaletta, ja ne taulukoitiin. Sen jälkeen mitattiin jokaisen keskusalueen pituus, koska viestintäjohtojen maksimiprojektio ei voi olla tätä etäisyyttä pidempi. Keskusalueen sijoittuminen ja pituus merkattiin taulukkoon pylväspaikan tarkkuudella. Myös maapotentialin laskennassa käytetyt todelliset vikavirrat, laukaisuajat sekä johdon pituustiedot taulukoitiin pylväspaikan tarkkuudella. Taulukoinnin avulla saatiin piirretyksi ensinnäkin voimajohtoa ympäröivien keskusalueiden sijoittuminen voimajohtoon nähden. Tämän jälkeen taulukosta saatiin selvitettyksi edellä mainitulla tavalla eri keskusalueilla viestintäjohtoon vaikuttava suurin mahdollinen indusoituva maavirta.

10.6 Laskelmien peruskäsitteitä

Myöhemmin tehtävissä rajapituuslaskelmissa nousee esiin sähkömotorinen voima ja keskinäisimpedanssi. Maasulun aikana viestintäverkon johtoihin indusoituu sähkömotorinen voima, joka saadaan laskettua kahden johtimen välisen keskinäisimpedanssin sekä maavirran tulona mukaan luettuna erilaiset reduktiokerroimet. Johtimista toinen on suurjännitejohto, jonka magneettikenttä indusoi vaarajännitteen toisena johtimena ajateltuun viestintäjohtoon. Sähkömotorisen voiman kaava on:

$$E = k_y * k_c * Z_m * r * I_m$$

E	indusoituva smv
k_y	ympäristön reduktionkerroin
k_c	telekaapelin vaipan reduktiokerroin
Z_m	tele- ja suurjännitejohtojen keskinäisimpedanssi
r	ukkosjohtimien reduktiokerroin
I_m	suurjännitejohtojen indusoima maavirta kappaleen 10.3 mukaisesti

Sähkömotorisen voiman laskennassa käytettäviä reduktiokertoimia:

(r) on voimalinjan ukkosjohtimista johtuva tuttu reduktiokerroin, joka otetaan huomioon maavirrassa. (k_y) on ympäristöstä johtuva kerroin eli ns. taajamakerroin. Kaupungeissa on runsas maahan yhteydessä oleva metallirakenteinen johtava verkko, joka rakentuu vesi-, viemäri- ja sähköjohdoista. Tällöin voidaan käyttää kerrointa 0,5, kun taas maaseudulla arvo on 1. Rautatien kiskoista tuleva induktiovaikutus voidaan ottaa laskuissa mukaan kertoimella 0,7, jos sähkörataetäisyys suurjännite- ja telejohdosta on enintään 100m. (k_c) eli telekaapelin vaipan reduktiokerrointa voidaan käyttää koaksiaalikaapeleiden suojalankojen tai kuparisuojalankojen yhteydessä arvojen vaihdella 0,5-0,8 välillä lankojen pinta-alasta riippuen. (VHV ohje 02, 11.)

Keskinäisimpedanssi (Z_m) on voimajohdon ja indusoituvan kohteen välisestä etäisyydestä, maasulkuvirran taajuudesta sekä maan ominaisresistiivisyydestä riippuva termi. Eräänlaisena matemaattisena terminä se kuvaa induktiovaikutuksen voimakkuutta kahden johtimen välillä. Keskinäisimpedanssin matemaattinen kaava johtaa Carson-Pollaczekin integraalikaavoihin, jotka ovat laskennallisesti hankalia. ITU-T 1999 julkaisussa on yksinkertaistettu kaava, jolla voidaan laskea eri etäisyyksille keskinäisimpedanssin suuruutta $Z_m = j\omega M = j2\pi fM$, jossa M on keskinäisinduktanssin kerroin:

$$x \leq 10: M = 142.5 + 45.96 * x - 1,413 * x^2 - 198.4 * \ln x, \left(\frac{\mu H}{km} \right)$$

$$x > 10: M = \frac{400}{x^2}, \left(\frac{\mu H}{km} \right)$$

$$\text{missä } x = d * \sqrt{\frac{\mu_0 * \omega}{\rho}}$$

d = indusoivan ja indusoituvan johtimen välinen etäisyys

$$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} \text{ (tyhjiön permeabiliteetti)}$$

$$\omega = 2 * \pi * f \text{ (verkon kulmataajuus)}$$

$$\rho = \text{maaperän johtavuus } \Omega m$$

Työn laskelmissa käytettiin luonnollisesti ukkosjohtimista laskettua reduktiokerrointa. Taajamareduktiokertoimen käytössä täytyy olla varovainen, ja sitä käytettiin vain yhden keskitinalueen laskuissa, jossa koko keskitinalue oli selvästi kaupungin keskellä. Telekaapelin vaipan reduktiokerrointa ei käytetty.

10.7 Varsinaiset rajapituuslaskelmat

Rajapituuslaskelman ajatus on pääpiirteittäin VHV ohjetta 02 sivuava laskelma, jossa lasketaan telejohdon ja voimajohdon eri etäisyyksillä vaikuttava keskinäisimpedanssi, indusoituva sähkömotorinen voima sekä voimajohdon kanssa yhdensuuntaisen telejohdon pituus, jolloin rajajännite 650V, 1500V tai 4000V ylittyy.

Laskelmissa käytettiin Sähköastekin omaa MaSul ohjelmaa. Laskelmat tehdään jokaiselle voimajohdon läheisyydessä olevalle keskusalueelle, jonka jälkeen on työkalu keskusalueiden sisällä olevien tilaajajohtojen selvittelyyn sekä keskittimien välisten yhdyskaapelien tarkasteluun. Kuvassa 23 on esimerkki yhden keskusalueen rajapituuslaskelmasta.

Kuva 23: Rajapituuslaskelma keskusalueelle 1.

Laskennan lähtöarvot:					
Ukkosjohtimien reduktiokerroin	0,39				
Taajamareduktiokerroin	1				
Maasulkuvirta keskitinalueella	3574	[A]			
indusoiva maavirta	1394	[A]			
vika-aika	0,2	[s]			
Viestintäviraston määr. raja-arvo:	1500	[V]			
f	50	[Hz]			
p	2300	[Ωm]			
Tyhjiön permeabiliteetti μ_0	1,3E-06	[H / m]			
Indusoituvan smv:n laskenta, keskitinalue:					
Nimi:	KESKITINALUE 1				
	Keskitinalueen voimajohdon suunt. laajuus [km]	Viestintäverkon johdon maks. yhd. suunt. pituus [km]	Etäisyys viest.verk. johdon projektiioon [m]		
	2,7	2,1	503		
Etäisyys [m]	Zkesk [mΩ]/[km]	smv [V]/[km]	650 V rajapituus [km]	1500 V rajapituus [km]	4000 V rajapituus [km]
20	344	479,5	1,4	3,1	8,3
30	318	443,2	1,5	3,4	9,0
40	301	419,6	1,5	3,6	9,5
50	287	400,0	1,6	3,7	10,0
60	275	383,3	1,7	3,9	10,4
70	266	370,8	1,8	4,0	10,8
80	258	359,6	1,8	4,2	11,1
90	250	348,5	1,9	4,3	11,5
100	244	340,1	1,9	4,4	11,8
150	219	305,3	2,1	4,9	13,1
200	201	280,2	2,3	5,4	14,3
250	188	262,0	2,5	5,7	15,3
300	177	246,7	2,6	6,1	16,2
400	159	221,6	2,9	6,8	18,0
500	146	203,5	3,2	7,4	19,7
800	118	164,5	4,0	9,1	24,3
1000	106	147,7	4,4	10,2	27,1
1500	83	115,7	5,6	13,0	34,6
2000	68	94,8	6,9	15,8	42,2
3000	48	66,9	9,7	22,4	59,8
4000	36	50,2	13,0	29,9	79,7
5000	27	37,6	17,3	39,9	106,3
6000	21	29,3	22,2	51,2	136,7

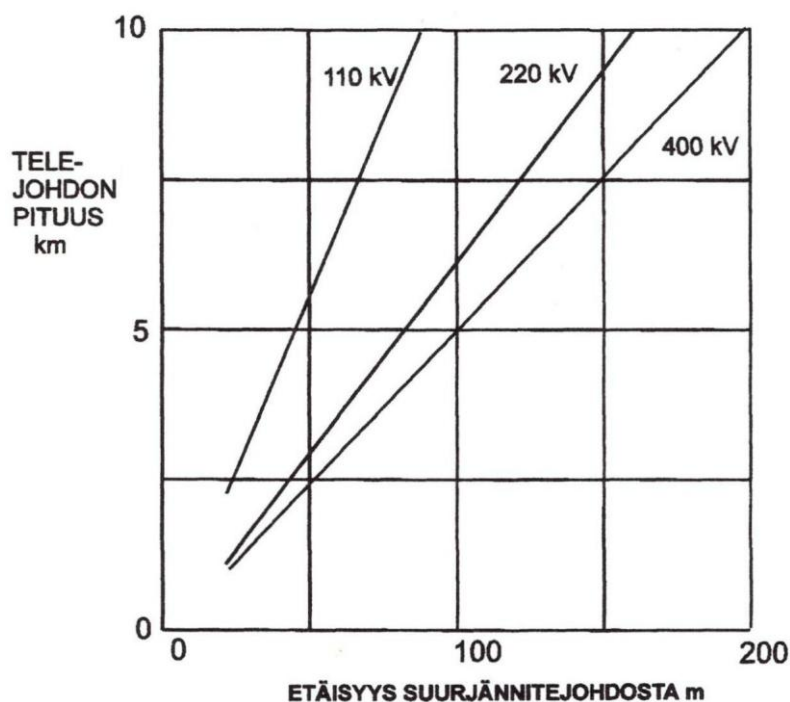
Laskelmaan tuodaan lähtöarvot keskusalueelta. Lähtöarvojen perusteella lasketaan keskinäisimpedanssi ja smv etäisyyden funktiona. Kyseinen keskusalue sijaitsee suojauksen 0,2s vyöhykkeellä, jolloin rajapituudet luetaan 1500V sarakkeesta, joka on lihavoituna kuvassa. Keskusalueen karttatarkastelussa on voimajohdon suuntaiseksi mitaksi saatu 2,7 km. Keskusalueelta on löytynyt maksimissaan 2,1 km pituinen voimajohdon suuntainen maksimiprojektio, joka on 503 m päässä voimajohdosta. Rajapituuslaskelmasta nähdään, että 500 m etäisyydellä saisi olla kuitenkin 7,4 km pitkä telejohto, jotta 1500 V rajajännite ylittyisi. Laskelman tapauksessa rajajännite ei ylity, joten muita toimenpiteitä ei tarvita. Tosinaan keskusalueen lähin nurkka sijaitsee jo niin etäällä voimajohdosta, että kyseisellä etäisyydellä vaadittava pituus on pidempi kuin itse keskus, jolloin induktiota ei tarvitse myöskään miettiä enempää.

10.8 Induktiiviset vaarajännitteet normaalikäytössä

Induktiivisten vaarajännitteiden tarkastelu aloitetaan tutkimalla voimajohdon normaalia käyttötilannetta. Jos telejohto kulkee voimajohdon kanssa yhdensuuntaisesti, siihen on mahdollista siirtyä induktiivisen kytkeytymisen kautta sähkömotorinen voima (smv), joka saattaa ylittää viestintäviraston laatimat raja-arvot.

Pitkällä suurjännitevoimalinjalla sijaitsee useita keskusalueita, keskittimiä ja runsas telejohtojen määrä, joten johtokohtainen laskennallinen määrittely olisi vaativa työ. Indusoituvan jännitteen suuruutta arvioitiin VHV-ohjeen 02 mukaisesti etäisyyksiin perustavalla tarkastelulla. Jotta indusoituva smv saavuttaisi määräyksissä annetun rajajännitteen, tarvitaan viestintäverkon johdolle tietty yhdensuuntainen pituus voimajohdon kanssa sekä etäisyys voimajohdosta. Voimajohdon normaalikäytöstä aiheutuva induktiojännite vaatii hyvin lähellä suurjännitejohtoa kulkevan telekaapelin. Voimajohdon vaiheiden vuorottelu johto-osuudella toimii myös sähkömotorista voimaa pienentävänä tekijänä. Kuvassa 24 on arvioitu telejohtojen pituutta, jolloin indusoituva smv saavuttaa rajajännitteen arvon. Etäisyys on suurjännitejohtojen keskivälistä jännitetasoilla 400/220/110 kV vaihevirtojen ollessa 1 kA. Kuvasta huomataan, että 110 kV jännitteellä voimajohdon vieressä 50m etäisyydellä täytyisi kulkea 5,5 km pitkä voimajohdon kanssa yhdensuuntainen telekaapeli, jotta rajajännite ylittyisi. (VHV ohje -02, 21.)

Kuva 24: Telejohdon pituus rajajännitteen saavuttamiseksi. (VHV ohje 02, 21)



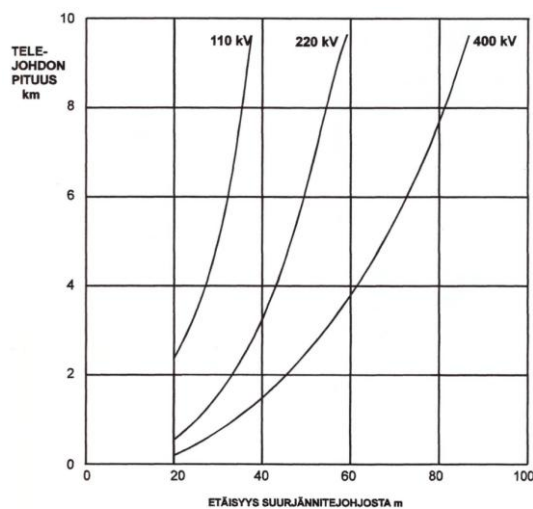
Normaalikäytössä indusoituvaa jännitettä selvittäessä tarkasteltiin kaikkien alueella vaikuttavien operaattoreiden viestintäverkon ilmajohdot ja kaapelit aina 100m etäisyydelle saakka. Koko aineiston ollessa CAD kuvassa referensseinä mittaustyökaluilla on helppo kahlata voimalinjaa läpi ja määritellä etäisyyksiä. Lähtökohtaisesti etsittiin pitkiä voimalinjan kanssa yhdensuuntaisia telejohtoja, joille määriteltiin etäisyys voimajohdosta. Yleisesti pituudet eivät aiheuttaneet rajajännitteiden ylittymistä, ja toisaalta pidemmät johdot olivat jo riittävän etäällä voimajohdosta. Muutaman kaapelin pituudesta johtuen tehtiin lisätiedusteluita operaattoreilta. Kyseessä olivat valokuituyhteydet, jotka ovat immuuneja induktion vaikutukselle.

10.9 Kapasitiiviset vaarajännitteet normaalikäytössä

Seuraavaksi tutkittiin kapasitiivisen kytkeytymisen mahdollisuutta induktioselvityksessä. Ilmiönä se on harvinainen, ja yleensä se on ollut vanhojen avojohtorakenteisten televerkkojen ongelma. Kapasitiivisesti kytkeytyvän jännitteen suuruutta arvioidaan myös VHV ohjeen 02 mukaisesti etäisyyksiin perustavalla tarkastelulla.

Kuvan 25 piirroksessa on esitetty kapasitiiviselle kytketykselle tarvittavia etäisyyksiä 400/220/110 kV suurjännitejohdoilla. Oletuksena on, että telejohto on voimajohdon suuntainen. 110 kV käyrä alkaa kohota 20-40m etäisyydellä eksponentiaalisesti vaatien jo 10 km yhdensuuntaista pituutta voimajohdon kanssa.

Kuva 25: Telejohdon pituus rajajännitteen saavuttamiseksi. (VHV ohje 02, 21)



Tarkastelun alla oleva voimajohto-osuus selvitettiin kapasitiivisen kytketyksen kannalta 100 m etäisyydelle saakka johdon keskiviivasta. Nykyisin käytettävän valokuidun vuoksi ilmassa kulkevat avojohtorakenteet ovat harvinaisia, eivätkä pituusedellytykset täyttäneet yhdelläkään keskusalueella. Viimeaikaisena virtauksena on ollut telejohtojen poistaminen käytöstä, mikä vähentää kapasitiivisen kytketyksen mahdollisuutta tulevaisuudessa.

10.10 Vaarajännitteet maasulun aikana

Maasulun aikana vaikuttavia induktiovaarajännitteitä varten käytettiin nimenomaisesti rajapituuslaskelmia, jotka kuvattiin kappalessa 10.7. Jokaiselle keskusalueelle tehtiin oma laskelma, jossa laskettiin viestintäverkon johdon suurin pituus eri etäisyydellä voimajohdosta.

Laskennan tulokset koottiin taulukon 5 muotoon, johon on kuvattu jokaisen keskusalueen tilanne. Taulukosta näkyy laskennallisesti saatu arvo keskusalueen viestintäjohdolle, jotta rajajännite ylittyisi.

Taulukko 5. Rajapituudet keskusalueittain

Keskusalueen nimi	Suurin mahdollinen viestintäverkon johdon yhdensuuntainen pituus [km]	Suurimman yhdensuuntaisen osuuden keskimääräinen etäisyys voimajohdosta [m]	Laskennallinen rajapituus induoituvalle jännitteelle [km]	Laskennallinen keskinäinen etäisyysvaatimus rajapituudelle [m]	rajajännite [V]
KESKUSALUE 1	2,7	500	7,0	500	650
KESKUSALUE 2	1,8	200	5,7	200	1500
KESKUSALUE 3	3,3	1600	13,4	1500	1500
.
.
KESKUSALUE 38	5,6	951	9,9	800	650

Induktiovaarajänniteselvitykseen selvitettiin kaikkien keskusalueitten induktiolla alttiit viestintäjohdot. Ensin käytiin läpi tilaajajohdot keskusalueittain, ja sen jälkeen tutkittiin keskittimien väliset kaapeloinnit. Digitaalisesta aineistosta näkyi jokaisen operaattorin johdot, niiden tyypit, maadoituspaikat, laitetilat sekä kaapelikaivot.

Voimajohto-osuus kulki osittain asumattomia seutuja, jolloin viestintäverkkoa oli runsaammin vain taajamissa ja kaupungeissa. Kaupungeissa taajamakerroin laskee induktiota aiheuttavan maavirran suuruutta ja keskusalue on pienempi. Pitkiä yhdensuuntaisia viestintäjohtoja voimajohdon kanssa ei löytynyt. Haja-asutusalueilta taa-sen löytyi pitkiä kuparikaapeleita, mutta etäisyys voimajohtoon oli sen verran suuri, että rajajännitteet eivät ylittyneet. Kaikista johtotyypeistä ei löytynyt tietoa, onko kyseessä kuparia vai kuitua, ja rajatilanteissa muutamasta tehtiin lisäkysely operaattoreille.

Laskelmissa oli mukana myös 4 kV rajajännitepituus, joka on indikaatio välisuoja-paikkojen tarkistamiselle pituuden ylittyessä keskitinalueiden välisillä yhdyskaapeleilla. Valokaapeleille välisuoja ei kuitenkaan rakenneta, mutta rakennustöissä täytyy huomioida mahdollinen vaarajännite esimerkiksi kuidun seurantajohtimessa, joka on käytännössä aina teräslanka. (VHV ohje 02, 18)

Rajapituuksien ylittäessä rajat induktiovaarajännitteen rajoittamiselle sopivat kaikki samat toimenpiteet, joita potentiaalin tarkastelussa käytiin läpi. Maasulkuvirran tai -potentiaalin pienentäminen näkyy myös induktiivisessa kytkeytymisessä. Yleensä ylitystapaukset ovat kuitenkin yksittäisiä, jolloin viestintäjohdolle tehdään omat suojaukset. Esimerkiksi johtimien parien päihin vaaditaan ylijännitesuojat keskuksissa. Avojohtojen päätepylväillä asennetaan myös ylijännitesuojat, maadoitukset ja tutkitaan vielä lisäylijännitesuojien tarve. (VHV ohje 02, 17)

Selvityksessä todettiin indusoivien jännitteiden alittavan Viestintäviraston määräyksen 43F/2015M raja-arvot, eikä toimenpiteitä tarvita. Viestintäverkon rakentamista on kuitenkin syytä valvoa erityisesti voimajohtojen läheisyydessä

11 YHTEENVETO

110 kV voimajohdon maadoitussuunnittelu mittauksineen, maapotentiaalin tarkastelu ja induktiovaarajänniteselvitys olivat kokonaisuudessaan laaja ja haastava, mutta erittäin mielenkiintoinen työ. Pääsin porautumaan työssä syvälle maadoitussuunnittelun, standardien ja raja-arvojen maailmaan. Työn lopputuloksena syntyi asiakkaalle koko voimalinjan maadoitussuunnitelma, dokumentti maapotentiaalin selvityksestä sekä induktiovaarajännitteen selvitysdokumentti.

Sähkön vaarallisuudesta johtuen maadoituksella ja vaarajännitteiden selvittelyllä on oma paikkansa sähköjärjestelmää kehitettäessä. Selvitettävää, tutkittavaa, analysointia ja vertailua oli todella paljon. Ensin olivat edessä koko voimalinjan maan ominaisvastusten mittaukset, osittain rankoissa olosuhteissa ja haastavissa mittauspaikeissa Suomen maaperällä. Työ vaati sisua pitää yllä korkea mittausten vaatimustaso, jotta jokainen mittaus tulisi tehtyä huolellisesti. Mittauksissa kilpailtiin aikaa vastaan, sillä talvi teki tuloaan, ja päivän pituus lyheni lyhenemistään. Mittaustyön sääolot vaihtelivat aurinkoisesta syyspäivästä vesisateeseen, myrskyyn, lumipyryyn ja pakkaseen.

Laskenta-, suunnittelu-, analysointi- ja vaarajänniteselvittelytyöissä päästiin sitten asian ytimeen. Laskentaa toteutettiin tarkasti kyseiselle linjalle. Maadoitusten teoriaa luettiin kilpaa standardien kanssa ja samalla tarkasteltiin tuloksia, suunniteltiin maadoituksia ja määriteltiin ihmisten käyttäytymistä ja oleskelua alueella pylväs pylväältä ja kirjoiteltiin kahta eri selvitystä. Auto-CADilla piirrettiin pylväskohtaiset maadoitussuunnitelmat valmiiksi.

Suurimmat haasteet työssä olivat ehdottomasti suunnittelussa. Tarkastelun alainen voimalinja oli sekalainen versio kaikista mahdollisista huomioonotettavista variaatioista. Linjan maadoitusolosuhteet olivat huonot, ja maapotentiaalit olivat vaarallisen korkeita. Linjalle osui kaupunkeja, taajamia, sähköasemia, risteäviä johtoja, rautatie ja sen mukana aseman syöttöjohtoja, maakaasun jakeluverkostoa, telekaapelointia, läheistä asutusta, vaarallisia tehtyjä virityksiä johtokadulle ja vanhojen maadoitusten sekä PJ-verkon maadoitusten suuri määrä. Ne kaikki piti selvittää henkilöturvallisuuden kannalta sekä maapotentiaalien tarkastelussa että induktiovaarajänniteselvityksissä. Työn aikana oli tehtävä useista pylväspaikan kohteista lisäselvityksiä eri vaihtoehtoja tarkastellen, mutta niiden esittely rajattiin pois tästä raportista.

Standardien ja ohjeiden vaikeaselkoisuus yllätti. Monesti samaa asiaa joutui pohtimaan useampaan kertaan, ennen kuin se avautui tarkoituksenmukaisesti. Ilmiönä maasulku ja maasulkuvirran kulku sekä ukkosjohtimissa että maaperässä vaativat tiettyä ajatustapaa. On vaikeaa käsittää maasulkuvirran menoa rytinällä kohti muuntajan tähtipistettä, kun ilmiötä ei näe silmin. Ja jos jotain näkisi niin katkaisijat olisivat toimineet jo kymmenien kilometrien päässä vajaassa 200 millisekunnissa!

Tekstissä olisi voinut keskittyä johonkin pieneen maadoitusten yksityiskohtaan syvällisesti, mutta katsoin tarpeelliseksi avata pylväismaadoitusten suunnittelua ja vaarajännitteiden selvittelyitä tehdyn työn ja karttuneen kokemuksen kannalta mahdollisimman paljon. Työn laajuuden vuoksi moni asia jäi osittain pintapuoliseksi, ja esimerkiksi vaarajännitteiden rajoittaminen ja niiltä suojaaminen jäivät todella pienelle huomiolle.

Tulevaisuudessa yhtiön muut suunnittelijat tai kesätyöntekijät voivat lukea tätä opinäytetyötä ”kansankielisenä” työoppaana. Standardeja kirjasin työhön vain osittain,

sillä työn laajuudesta johtuen niiden käsittely olisi vienyt liikaa tilaa. Työhön ryhtyessä käytetään aina uusimpia standardeja, joista löytyvät tarkat tiedot. Otin standardeista vain sopivia viittauksia työn kannalta oleellisiin kohtiin.

Työn kautta avautui aivan uusi näköala Suomen sähkönsiirtojärjestelmään ja sen pitkäaikaiseen kehittämiseen. Kantaverkon kehitys on seurannut kansakuntamme kehittymistä maatalousyhteiskunnasta nykyaikaiseksi, teollistuneeksi yhteiskunnaksi, jossa sähkön saatavuus ja käyttövarmuus ovat elinehto. Kehitys ei pysähdy, vaan tälläkin hetkellä on käynnissä isoja sähköasemauudistuksia, tuulivoimatuotannon kytke mistä kantaverkkoon sekä sähköntuotannon projekteja (OL3, Eurajoki sekä Pyhäjoki).

LÄHTEET

- Elovaara, J. & Laiho, Y. 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto.
- Elovaara, J & Haarla, L. 2011. Sähköverkot 2 - Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Gaudeamus Helsinki University Press: Otatieto.
- Fingrid Oyj www-sivut. Viitattu 3.3.2016. <http://www.fingrid.fi/>
- Gasum Oyj www-sivut. Viitattu 9.4.2016. <http://www.gasum.fi/>
- Imatran Voima 1973. Sähköosasto, sisäinen ohje. 110...400 kV johtojen pylväsmäadoitusten suunnittelu.
- INSKO 1976. 92-76. 110kV johtojen suunnittelu, rakentaminen ja kunnossapito. Helsinki
- ITU-T 1999. Directives Volume 2, Calculating induced voltages and currents in practical cases, Geneva: International Telecommunication Union, 1999, 660s.
- ITU-T 04/2008. Recommendation ITU-T K.98 Series K: Protection against interference. Operator responsibilities in the management of electromagnetic interference by power systems on telecommunication systems. Telecommunication standardization sector of ITU. Geneva, ITU. Viitattu 23.4.2016. <https://www.itu.int>
- Lehtonen, P. 2016. Käyttö- ja sähkötyön turvallisuus kantaverkossa. Luento Fingrid Oyj:n koulutuksessa Tampereella Hotelli Ilves 28.1.2016.
- Liikennevirasto 21/2013. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 5 Sähköistetty rata.
- Paukkunen, E. 2016. Toimitusjohtaja, Sähköastek Oy. Pori. Henkilökohtainen tiedonanto 10.1.2016.
- Ratahallintokeskus 2004. Yleisohje johdoista ja kaapeleista ratahallintokeskuksen alueella.
- SFS-KÄSIKIRJA 601. 2009. Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohtot. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki: SFS.
- SFS 6001. 2015. Suurjännitesähköasennukset. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki: SFS.
- SFS-KÄSIKIRJA 603. 2010. Ilmajohtostandardit. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki: SFS.
- SFS-KÄSIKIRJA 600-3. 2012. Sähköasennukset. Osa3: Sähkötyöturvallisuus. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki: SFS.
- SFS 5717. Maakaasun siirtoputkiston sijoittaminen suurjännitejohdon tai -kytkinlaitoksen läheisyyteen. 1992. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Helsinki: SFS.
- Sorri, H. 2016. Suunnittelija. Sähköastek Oy. Pori. Henkilökohtainen tiedonanto 10.9.2015.

Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta. 2001. VHV- ohje 02.

Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta. 2001. VHV- ohje 05.

Viestintävirasto 43 F/2015M. 2015. Määräys viestintäverkon sähköisestä suojaamisesta. Helsinki: Viestintävirasto

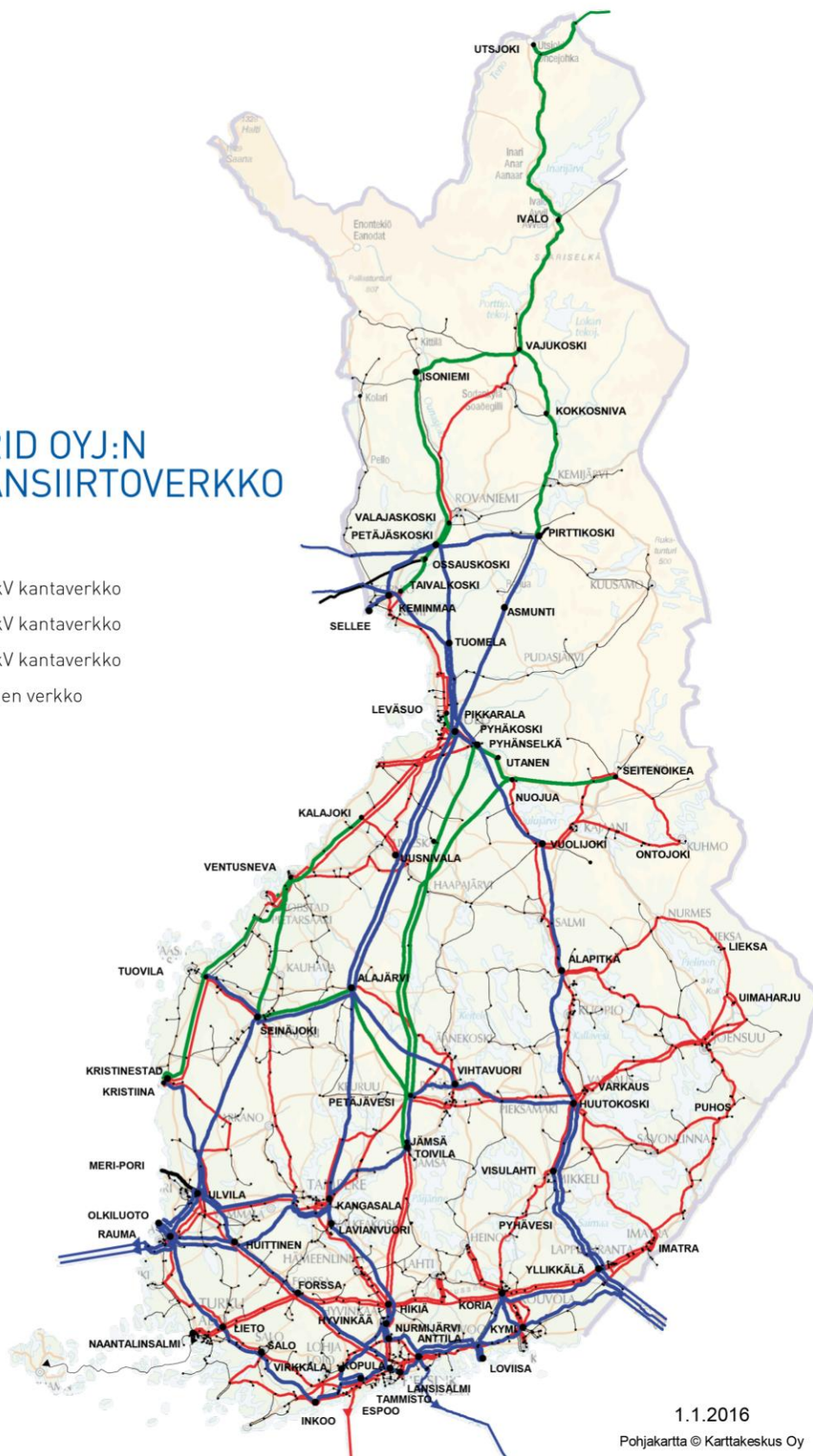
Välimaa, K, 1992. Suurjännitejohtojen aiheuttamat vaarajännitteet. INSKO 331827-92 XIV.

Wikipedia, OPGW aiheen www-sivut. Viitattu 19.4.2016.
https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_ground_wire

FINGRID OYJ:N VOIMANSIIRTOVERKKO

1.1.2016

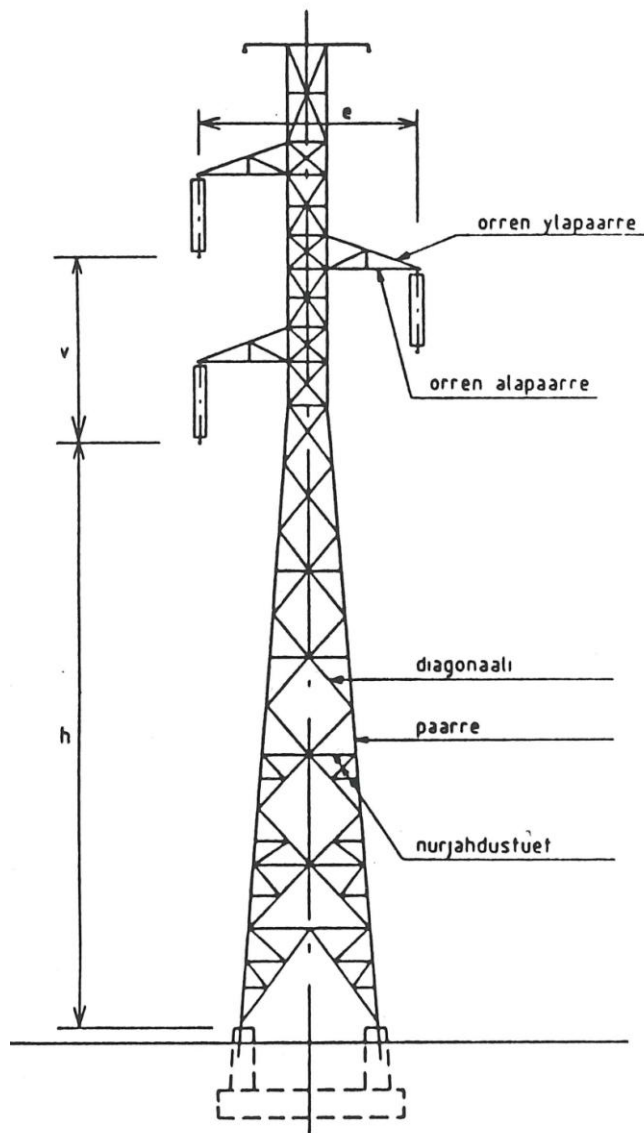
- 400 kV kantaverkko
- 220 kV kantaverkko
- 110 kV kantaverkko
- muiden verkko



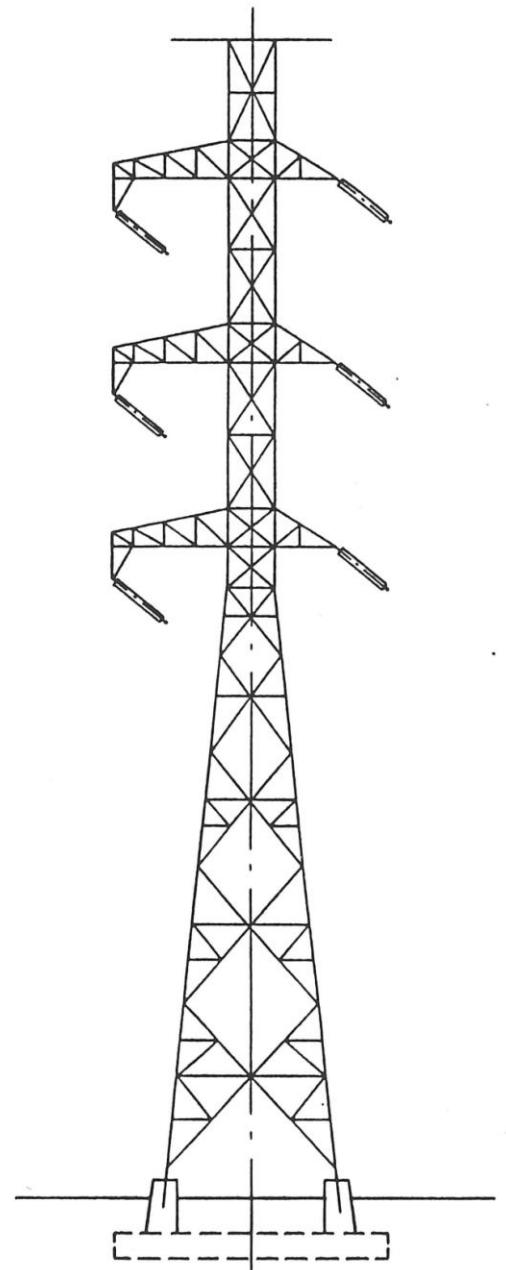
1.1.2016

Pohjakartta © Karttakeskus Oy

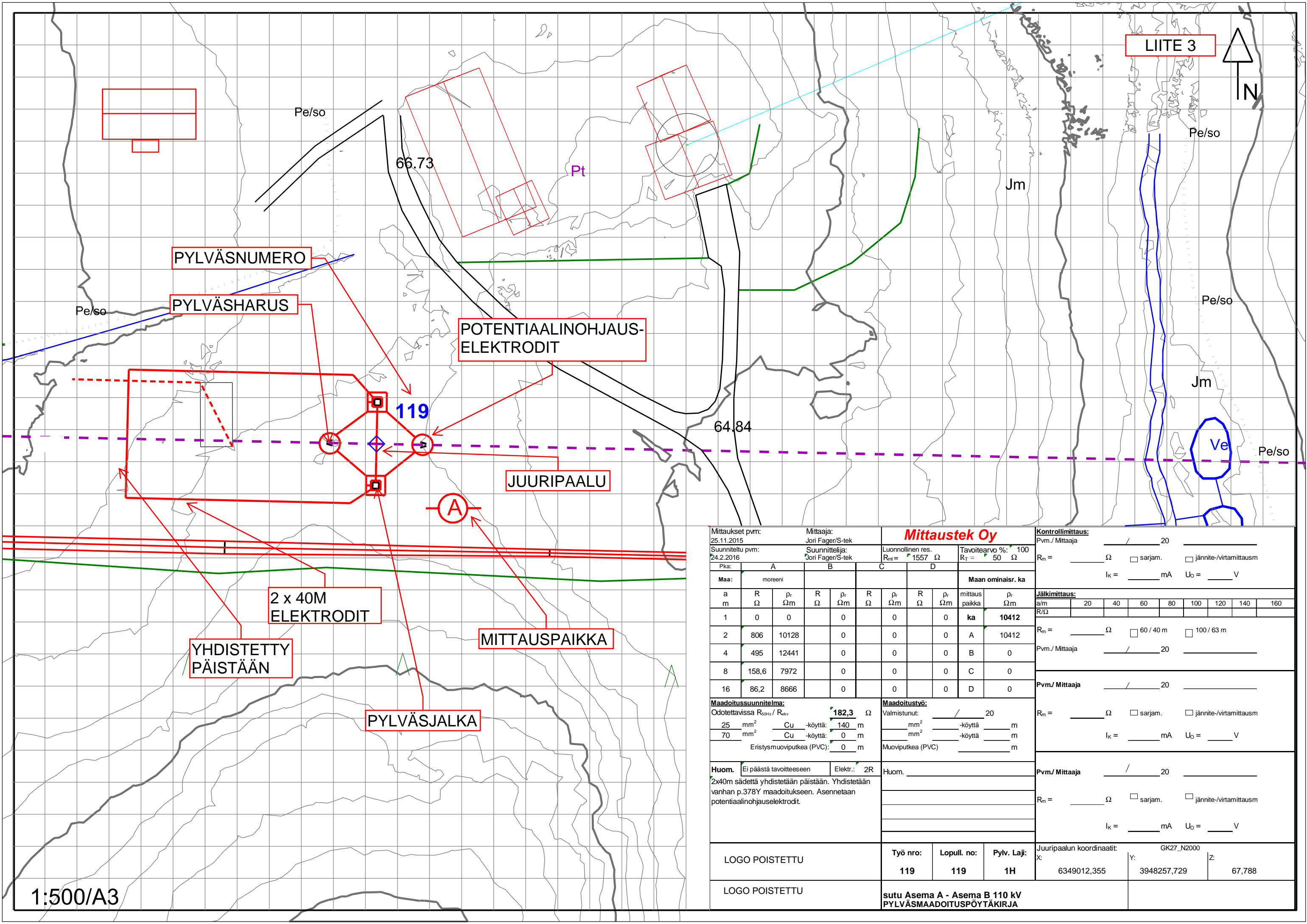
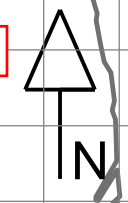
LIITE 2



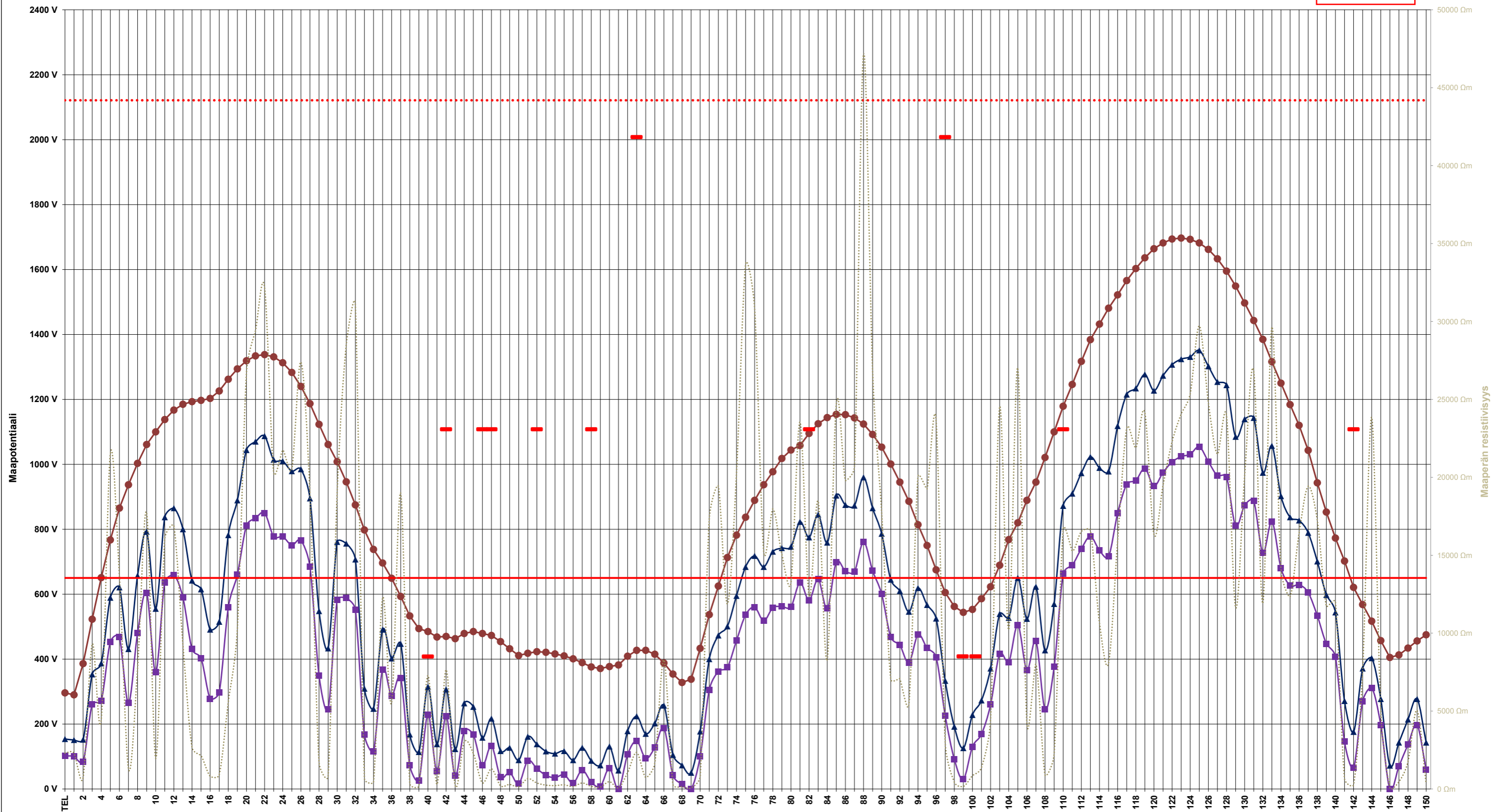
Vapaastiseisova yhden virtapiirin pylvas



Vapaastiseisova kahden virtapiirin kannatuspylväs



Mittaukset pvm: 25.11.2015 Suunniteltu pvm: 24.2.2016	Mittaja: Jori Fager/S-tek Suunnittelija: Jori Fager/S-tek	Mittaustek Oy	Kontrollimitaus: Pvm/ Mittaaja: _____ / _____ 20									
Pka: _____	Luonnollinen res. $R_{nl} = 1557 \Omega$	Tavoitearvo %: $R_T = 50 \Omega$	$R_m =$ _____ Ω <input type="checkbox"/> sarjam. <input type="checkbox"/> jännite-/virtamittausm									
Maa: moreeni	Maan ominaisr. ka		$I_k =$ _____ mA $U_0 =$ _____ V									
a	R	ρ_r	R	ρ_r	R	ρ_r	R	ρ_r	mittaus paikka	ρ_r	Jälkimittaus:	
m	Ω	Ωm	Ω	Ωm	Ω	Ωm	Ω	Ωm			a/m	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	ka	10412	20 40 60 80 100 120 140 160	
2	806	10128	0	0	0	0	0	0	A	10412	$R_m =$ _____ Ω <input type="checkbox"/> 60 / 40 m <input type="checkbox"/> 100 / 63 m	
4	495	12441	0	0	0	0	0	0	B	0	Pvm/ Mittaaja: _____ / _____ 20	
8	158,6	7972	0	0	0	0	0	0	C	0	Pvm/ Mittaaja: _____ / _____ 20	
16	86,2	8666	0	0	0	0	0	0	D	0	Pvm/ Mittaaja: _____ / _____ 20	
Maadoitussuunnitelma:		Odottavissa R_{50Hz} / R_{ekv}		182,3 Ω		Maadoitustyyppi:		Valmistunut: _____ / _____ 20		$R_m =$ _____ Ω <input type="checkbox"/> sarjam. <input type="checkbox"/> jännite-/virtamittausm		
25	mm ²	Cu	-köyttä:	140	m	_____	mm ²	_____	-köyttä	_____	$I_k =$ _____ mA $U_0 =$ _____ V	
70	mm ²	Cu	-köyttä:	0	m	_____	mm ²	_____	-köyttä	_____	Pvm/ Mittaaja: _____ / _____ 20	
Eristysmuoviputkea (PVC):		0		m		Muoviputkea (PVC):		_____		_____ m		
Huom. Ei päästä tavoitteeseen Elektr.: 2R		2x40m sädettä yhdistetään päistään. Yhdistetään vanhan p.378Y maadoitukseen. Asennetaan potentiaalinohjauselektrodit.				Huom.				$R_m =$ _____ Ω <input type="checkbox"/> sarjam. <input type="checkbox"/> jännite-/virtamittausm		
LOGO POISTETTU		Työ nro:	119	Lopull. no:	119	Pylv. Laji:	1H	Juuripaalun koordinaatit: GK27_N2000		X: 6349012,355 Y: 3948257,729 Z: 67,788		
LOGO POISTETTU		sutu Asema A - Asema B 110 kV			PYLVÄSMAADOITUSPÖYTÄKIRJA							



SÄHKÖASEMA A

SÄHKÖASEMA E

Maasulun kokonaislaukaisuaika tkok ≤ 0,5 s.

MAAPOTENTIALI LASKETTU EKVALENTTISELLÄ MAASULKUVIRRALLA

- Potentiaali pylväällä
- ▲— Maapotentiaali 20 m etäisyydellä pylväältä
- Maapotentiaali 100 m etäisyydellä pylväältä
- SFS-EN 50341-1/A1 maadoitusjänniteelle annettu raja-arvo 2x UD2
- Viestintäviraston määräyksen 43F/2015M:n §14 määrittämä raja-arvo
- SFS-EN 50341-3-7 siirtyneelle potentiaalille annettu raja-arvo
- Pylväspaikan maaperän resistiivisyys [Ωm]

Päiväys 22.3.2016		Otsikko VAARAJÄNNITSELVITYS ASEMA A - ASEMA B 110 kV JOHDON POTENTIALIPROFIILI		Versio M0		Lehti/Lehtiä 1 / (2)	
Suunn. JFa		Tark. / Hyv.		Mittakaava		Paperi A3	
				Piirustusnumero LIITE 4.			

VAARAJÄNNITSELVITYKSEN MAAPOTENTIAALILASKENTA

AE-XXXX Asema A - Asema B

Laskentatulokset, vian tkok=0,5s. ekvivalenttisella vikavirralla

Johtimet: Virtajohtimet 3x2x "Duck", ukkosjohtimet 2x "Sustrong"

Pylväiden h-mitan keskiarvo:	19,0	m
Jännevälin keskiarvo:	235,0	m
Tutkittavan johto-osuuden pituus:	80,0	km
Ukkosjohtimien impedanssin itseisarvo:	0,71	L Ω /km
Ukkosjohtimista aiheutuvan reduktiokertoimen itseisarvo, r :	0,39	L $^{\circ}$
Johdon 1-vaiheisen maasulkuvirran kokonaislaskausaika tkok :	0,5	s
Johdon 1-vaiheisen maasulkuvirran vika-aika t :	0,5	s
Maaperän resistiivisyyden keskiarvo pylväspaikoilla:	9784	Ω m

Tiedot pylväspaikoilta				Vikatiedot			Laskennallinen potentiaali			Määrausten raja-arvot		
Mitta johdon alusta [m]	Pylväs nro.	Maanperän resistiivisyys [Ω m]	Odotettavissa oleva maadoitus-resistanssi Rm [Ω]	Pylväsmaadoituksen potentiaalintasauselektrodi?	Pylväällä vaikuttava ekviv. maasulkuvirta 3*10ekv [A], tkok 0,5s	Vika-ajalle t[s]	Potentiaali pylväällä [V]	Maapotentiaali 20 m etäisyydellä [V]	Maapotentiaali 100 m etäisyydellä [V]	43F/2015 M §14 [V], tkok 0,5s	SFS-EN 50341-1, 2*U _{D1} [V], tkok 0,5s	SFS-EN 50341-3-7 [V], tkok 0,5s
0	TEL	2300	0,6	kyllä	2817	0,5	296	154	102	650	1108	2121
87	1	2300	0,6	ei	2809	0,5	290	151	100	650	1108	2121
396	2	725,83357	7,7	ei	2802	0,5	386	152	84	650	1108	2121
707	3	9289,0612	98,3	ei	2795	0,5	523	353	261	650	1108	2121
1008	4	4453,5217	55,9	kyllä	2787	0,5	651	387	272	650	1108	2121
1313	5	21506,924	211,5	ei	2780	0,5	767	589	453	650	1108	2121
1617	6	13676,4	171,8	ei	2773	0,5	865	621	468	650	1108	2121
1891	7	1303,5515	13,8	ei	2766	0,5	937	431	265	650	1108	2121
2170	8	7725,8047	62,3	ei	2759	0,5	1003	657	480	650	1108	2121
2470	9	17720,258	164,0	kyllä	2752	0,5	1061	792	604	650	1108	2121
2736	10	1966,637	12,9	ei	2746	0,5	1100	555	360	650	1108	2121
.	.	16053,12	317,6	ei	2739	0,5	1138	837	636	650	1108	2121
.	.	16906,795	136,3	ei	2732	0,5	1167	865	659	650	1108	2121
.	.	9258,9019	74,6	ei	2725	0,5	1185	800	590	650	1108	2121
.	.	2674,5425	40,9	ei	2719	0,5	1193	642	431	650	1108	2121
.	.	2138,4612	17,2	ei	2712	0,5	1197	615	403	650	1108	2121
.	.	819,74624	6,6	ei	2705	0,5	1203	491	278	650	1108	2121
.	.	913,15626	7,4	ei	2699	0,5	1226	515	298	650	1108	2121
.	.	5597,8992	45,1	ei	2692	0,5	1262	782	559	650	1108	2121
.	.	10306,937	83,1	ei	2685	0,5	1294	889	660	650	1108	2121
.	.	26695,998	215,2	ei	2679	0,5	1319	1044	811	650	1108	2121
.	.	29422,062	237,1	ei	2672	0,5	1334	1070	834	650	1108	2121
.	.	32173,26	385,6	ei	2666	0,5	1338	1087	850	650	1108	2121
.	.	20309,768	163,7	ei	2661	0,5	1331	1014	778	650	1108	2121
.	.	21749,874	175,3	ei	2656	0,5	1313	1010	777	650	1108	2121
.	.	20533,45	165,5	ei	2651	0,5	1283	979	751	650	1108	2121
.	.	27390,499	220,8	ei	2646	0,5	1240	985	766	650	1108	2121
.	.	18898,984	152,3	ei	2641	0,5	1186	894	684	650	1108	2121
.	.	1692,2712	18,0	ei	2636	0,5	1123	548	349	650	1108	2121
.	.	820,584	7,1	ei	2631	0,5	1061	433	246	650	1108	2121
.	.	19072,4	153,7	ei	2627	0,5	1008	761	582	650	1108	2121
.	.	28525,661	280,6	ei	2622	0,5	946	756	588	650	1108	2121
.	.	31047,313	250,2	ei	2617	0,5	875	707	552	650	1108	2121
.	.	674,56277	5,4	ei	2612	0,5	798	309	168	650	1108	2121
.	.	417,11973	3,4	ei	2607	0,5	738	247	116	650	1108	2121
.	.	12254,725	154,6	ei	2602	0,5	696	491	368	650	1108	2121
.	.	5554,3358	40,1	ei	2598	0,5	649	402	287	650	1108	2121
75158	270	18965,167	152,8	ei	2593	0,5	593	447	342	650	1108	2121
75420	271	348,92622	2,8	ei	2588	0,5	533	168	73	650	1108	2121
75708	272	161,6873	2,0	ei	2583	0,5	494	114	26	650	1108	2121
76008	273	7283	1490,1	kyllä	2579	0,5	485	315	229	650	408	2121
76298	274	290,53449	2,3	ei	2549	0,5	468	138	55	650	1108	2121
76654	275	7649,5687	58,6	kyllä	2520	0,5	470	307	224	650	1108	2121
77012	276	224,0165	1,8	ei	2492	0,5	463	123	41	650	1108	2121
77375	277	3015,7614	24,3	ei	2466	0,5	479	264	179	650	1108	2121
77731	278	2280,88	18,4	ei	2441	0,5	485	253	167	650	1108	2121
78081	279	397,93507	3,9	kyllä	2417	0,5	479	158	73	650	1108	2121
78429	280	1291,8229	18,0	kyllä	2395	0,5	473	217	133	650	1108	2121
78776	281	206,50736	4,8	ei	2374	0,5	454	117	36	650	1108	2121
79109	282	290,70204	5,8	ei	2354	0,5	432	127	51	650	1108	2121
79398	283	142,41887	1,5	ei	2336	0,5	411	89	16	650	1108	2121
79707	284	666,43652	7,0	ei	2320	0,5	418	161	87	650	1108	2121
79994	285	385,95513	6,8	kyllä	2305	0,5	423	138	63	650	1108	2121
80254	286	247,13862	4,9	ei	2292	0,5	421	116	42	650	1108	2121
80528	287	217,02122	4,3	ei	2281	0,5	416	109	35	650	1108	2121
80802	288	266,44894	5,3	ei	2271	0,5	410	117	44	650	1108	2121
81062	289	150,00058	5,6	ei	2263	0,5	401	89	18	650	1108	2121
81324	290	386,751	4,5	ei	2256	0,5	389	127	58	650	1108	2121
81542	291	164,61946	2,9	kyllä	2252	0,5	376	87	21	650	1108	2121

MO 18.3.2016 /JFa /S-tek

Asiakas: TIETO POISTETTU

Asema: Sähköasema D 110/20kV

Ekvivalenttinen impedanssi Ze: 1,24 Ω L ° (laskennasta pp. 139)

Tilanne vuonna 2016 3I0 = 3,500 kA Syöttö molemmilta asemilta

Maasulkuvirrat:	Syöttösuunta	kri	1. Laukaisuporras		2. Laukaisuporras		3. Laukaisuporras	
			3I0i	kA 0,2 s.	3I0i	kA s.	3I0i	kA s.
Asema A		0,39	1,80					
Asema B		0,39	1,70					
Tilanne vuonna 2016	Σ (kri * 3I0i):		1,365 kA	, t = 0 ... 0,2 s.	0 kA	,t=0 ... s.	0 kA	,t= ... s.
Maadoitusjännite:	Za * Σ (kri * 3I0i):		1693 V	, t = 0 ... 0,2 s.	0 V	,t= 0 ... s.	0 V	,t= ... s.
Määräysten raja-arvot:	SFS 6001+A1+A2,							
		UTP:	500 V	Raja ylittyy	V	ei ylity	V	ei ylity
		2x UTP:	1000 V	Raja ylittyy	V	ei ylity	V	ei ylity
		4x UTP:	2000 V	ei ylity	V	ei ylity	V	ei ylity
		Viestintävirasto 43F/2015M:	1500 V	Raja ylittyy	V	ei ylity	V	ei ylity

Tilanne vuonna 2016 3I0 = 1,90 kA Syöttö asemalta A kun asema B auki

Maasulkuvirrat:	Syöttösuunta	kri	1. Laukaisuporras		2. Laukaisuporras		3. Laukaisuporras	
			3I0i	kA 0,2 s.	3I0i	kA s.	3I0i	kA s.
Asema A		0,39	1,90					
Tilanne vuonna 2016	Σ (kri * 3I0i):		0,741 kA	, t = 0 ... 0,2 s.	0 kA	,t=0 ... s.	0 kA	,t= ... s.
Maadoitusjännite:	Za * Σ (kri * 3I0i):		919 V	, t = 0 ... 0,2 s.	0 V	,t= 0 ... s.	0 V	,t= ... s.
Määräysten raja-arvot:	SFS 6001+A1+A2,							
		UTP:	500 V	Raja ylittyy	V	ei ylity	V	ei ylity
		2x UTP:	1000 V	ei ylity	V	ei ylity	V	ei ylity
		4x UTP:	2000 V	ei ylity	V	ei ylity	V	ei ylity
		Viestintävirasto 43F/2015M:	1500 V	ei ylity	V	ei ylity	V	ei ylity

Tilanne vuonna 2016 3I0 = 1,74 kA Syöttö asemalta B kun asema A auki

Maasulkuvirrat:	Syöttösuunta	kri	1. Laukaisuporras		2. Laukaisuporras		3. Laukaisuporras	
			3I0i	kA 0,2 s.	3I0i	kA s.	3I0i	kA s.
Asema B		0,39	1,74					
Tilanne vuonna 2016	Σ (kri * 3I0i):		0,679 kA	, t = 0 ... 0,2 s.	0 kA	,t=0 ... s.	0 kA	,t= ... s.
Maadoitusjännite:	Za * Σ (kri * 3I0i):		841 V	, t = 0 ... 0,2 s.	0 V	,t= 0 ... s.	0 V	,t= ... s.
Määräysten raja-arvot:	SFS 6001+A1+A2,							
		UTP:	500 V	Raja ylittyy	V	ei ylity	V	ei ylity
		2x UTP:	1000 V	ei ylity	V	ei ylity	V	ei ylity
		4x UTP:	2000 V	ei ylity	V	ei ylity	V	ei ylity
		Viestintävirasto 43F/2015M:	1500 V	ei ylity	V	ei ylity	V	ei ylity